

## Trabajo Fin de Grado

Evaluación de riesgo, desarrollo y puesta en marcha  
del procedimiento de medida de un generador de  
impulsos de 500 kV

Risk assesment, development and implementation of  
the measurement procedure for a 500 kV pulse  
generator

Autora

Layla El kajouai Ben allal

Directores

Jesús Letosa Fleta  
Miguel García Gracia

Ingeniería eléctrica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2020/2021



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D<sup>a</sup>. Layla El kajouai Ben allal ,en

aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado (Título del Trabajo)

Evaluación de riesgo, desarrollo y puesta en marcha del procedimiento de medida de un generador de impulsos de 500 kV

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de Junio 2021



Fdo: Layla El kajouai Ben allal

## Resumen

El generador de impulsos tipo Marx fue descrito por primera vez por Erwin Otto Marx en el año 1924. Se trata de un circuito eléctrico formado por una combinación de resistencias y condensadores que permite generar una onda en tensión elevada que simula el rayo producido durante una tormenta eléctrica. Mediante el generador de Marx es posible ensayar el comportamiento de la aparamenta eléctrica frente al impulso tipo rayo.

En el presente proyecto se persiguen los siguientes objetivos:

- Desarrollar un procedimiento de aplicación de las normas de seguridad vigentes al laboratorio para que la instalación sea segura cuando haya personal trabajando.
- Describir las partes de las que está compuesto el generador de Marx y su funcionamiento básico
- Desarrollo de un procedimiento de medida que permita registrar datos fiables del impulso generado durante los ensayos.

Para cumplir con los objetivos citados se han descrito las condiciones que le son de aplicación a la instalación de acuerdo a la normativa. Se ha estudiado la instalación desde el punto de vista teórico y se ha analizado su comportamiento de forma analítica, posteriormente se ha contrastado la información simulando la forma de onda tipo rayo usando la herramienta de simulación Matlab Simulink. Finalmente se han verificado los resultados realizando ensayos en el laboratorio y planteando posibles mejoras.

# Índice general

|  |    |
|--|----|
| 1. Introducción .....  | 6  |
| 2. Descripción de la instalación.....  | 7  |
| 3. Evaluación de riesgos.....  | 9  |
| 3.1. Condiciones de trabajo.....   | 9  |
| 3.2. Medidas de seguridad.....   | 10 |
| 3.2.1. Aspectos de la instalación .....  | 10 |
| 3.2.2. Técnicas y procedimientos .....   | 11 |
| 3.3. Disposiciones particulares.....   | 13 |
| 4. Estudio teórico .....   | 15 |
| 4.1. Introducción .....  | 15 |
| 4.2. Modelo equivalente.....   | 15 |
| 4.3. Descripción de la onda .....  | 16 |
| 4.4. Análisis matemático .....   | 18 |
| 4.5. Simulación en Simulink .....  | 19 |
| 4.6. Divisor de tensión capacitivo .....   | 20 |
| 4.7. Cable coaxial .....   | 21 |
| 4.8. Sondas de medida.....   | 22 |
| 5. Medidas experimentales .....  | 27 |
| 6. Conclusiones .....  | 29 |
| 7. Líneas futuras.....   | 30 |
| Bibliografía .....   | 31 |
| Anexo 1. Obtención de las medidas de la valla.....   | 33 |
| Anexo 2. Procedimiento de operación de la instalación .....                                | 34 |
| 2. 1. Procedimiento ensayo generador de impulsos .....                                     | 34 |
| 2. 2. Actuaciones en la zona de generación.....  | 36 |
| Anexo 3. Boletín para el control de la supresión de la tensión .....                       | 37 |
| Anexo 4. Imágenes de la instalación.....   | 38 |
| Anexo 5. Señales.....  | 42 |
| Anexo 6. Circuito equivalente y datos de la instalación .....                              | 43 |
| Anexo 7. Cálculo de la tensión en Cb .....   | 45 |
| Anexo 8. Cálculo tiempo $T_1$ y $T_2$ .....  | 48 |
| Anexo 9. Compensación divisor resistivo .....  | 51 |
| Anexo 10. Cálculos de las ecuaciones de compensación .....                                 | 56 |
| Anexo 11. Características de los atenuadores .....   | 59 |
| Anexo 12. Circuito equivalente completo.....   | 61 |
| Anexo 13. Código Matlab que obtiene $T_1$ y $T_2$ a partir de datos del osciloscopio ..... | 63 |

# Índice de imágenes

|  |    |
|--|----|
| Imagen 1: Esquema de la instalación .....  | 7  |
| Imagen 2: Bloque M del armario de control .....  | 7  |
| Imagen 3: Bloque B del armario de control .....  | 7  |
| Imagen 4: Bloque Z del armario de control .....  | 8  |
| Imagen 5: Bloque T del armario de control .....  | 8  |
| Imagen 6: Bloque I del armario de control .....  | 8  |
| Imagen 7: Circuito genérico de la escalera de Marx + Divisor capacitivo .....                  | 15 |
| Imagen 8: Circuito equivalente generador de Marx .....   | 15 |
| Imagen 9: Representación de los parámetros temporales del impulso tipo rayo [8]. .....         | 17 |
| Imagen 10: Representación de la carga y descarga de $C_{bt}$ con dos exponenciales [10]. ..... | 17 |
| Imagen 11: Simulación en Simulink de la tensión $V_{Cbt}$ .....                                | 19 |
| Imagen 12: Distribución de capacidades parásitas en el divisor capacitivo [11]. .....          | 21 |
| Imagen 13: Adaptación de impedancia a la entrada del cable coaxial [12]. .....                 | 21 |
| Imagen 14: Medida con sonda diferencial antes del filtrado.....                                | 22 |
| Imagen 15: Medida con sonda diferencial filtrada.....  | 22 |
| Imagen 16: Sonda diferencial.....  | 23 |
| Imagen 17: Sonda Tektronix TPP0250 .....   | 23 |
| Imagen 18: Medida con sonda Tektronix TPP0250 antes del filtrado .....                         | 23 |
| Imagen 19: Onda tipo rayo con sonda Tektronix TPP0250 .....                                    | 24 |
| Imagen 20: Circuito atenuador + osciloscopio a alta frecuencia.....                            | 24 |
| Imagen 21: Filtro paso bajo.....   | 24 |
| Imagen 22: Atenuador de baja impedancia de entrada.....  | 25 |
| Imagen 23: Impulso tipo rayo con atenuador de baja impedancia .....                            | 25 |
| Imagen 24: Sonda Testec TT-HV 251 de 2.5 kVp.....  | 26 |
| Imagen 25: Medida experimental del impulso tipo rayo (Medida 1).....                           | 27 |
| Imagen 26: Medida experimental del impulso tipo rayo (Medida 2).....                           | 27 |
| Imagen 27: Bloque M del armario de control .....   | 38 |
| Imagen 28: Bloque B del armario de control .....   | 38 |
| Imagen 29: Bloque Z del armario de control .....   | 38 |
| Imagen 30: Bloque T del armario de control .....   | 39 |
| Imagen 31: Bloque I del armario de control.....  | 39 |
| Imagen 32: Seta de emergencia.....   | 39 |
| Imagen 33: Transformador+ rectificador .....   | 40 |
| Imagen 34: Columna aisladora.....  | 40 |
| Imagen 35: Divisor de tensión capacitivo .....   | 41 |
| Imagen 36: Señalización del punto de conexión de la pértiga de puesta a tierra .....           | 41 |
| Imagen 37: Señal de advertencia.....   | 42 |
| Imagen 38: Señal de obligación de uso de calzado .....   | 42 |
| Imagen 39: Señal de obligación de uso de guantes .....   | 42 |
| Imagen 40: Circuito genérico del generador de Marx.....  | 43 |
| Imagen 41: Conversión circuito genérico paso 1 .....   | 43 |
| Imagen 42: Conversión circuito genérico paso 2 .....   | 44 |
| Imagen 43: Circuito equivalente .....  | 44 |
| Imagen 44: Circuito equivalente en el dominio de Laplace .....                                 | 45 |
| Imagen 45: Impulso tipo rayo .....   | 48 |
| Imagen 46: Circuito atenuador + osciloscopio a baja frecuencia.....                            | 51 |
| Imagen 47: Circuito atenuador + osciloscopio a alta frecuencia.....                            | 51 |
| Imagen 48: Filtro paso bajo.....   | 52 |
| Imagen 49: Circuito con compensación .....   | 52 |
| Imagen 50: Representación circuito sin compensar en Simulink.....                              | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Imagen 51: Tensión de salida para 50 Hz .....                            | 54 |
| Imagen 52: Tensión de salida para la $f_c = 811$ kHz sin compensar.....  | 54 |
| Imagen 53: Representación circuito compensado en Simulink.....           | 54 |
| Imagen 54: Tensión de salida para $f_c = 811$ kHz con compensación ..... | 55 |
| Imagen 55: Tensión de salida para 10 MHz.....                            | 55 |
| Imagen 56: Atenuador de baja impedancia de entrada.....                  | 59 |
| Imagen 57: Sonda Testec TT-HV -251 .....                                 | 59 |
| Imagen 58: Sonda diferencial.....  | 59 |
| Imagen 59: Sonda pasiva de alta impedancia.....                          | 60 |
| Imagen 60: Sonda diferencial de alta impedancia visto de cerca.....      | 60 |
| Imagen 61: Circuito equivalente completo .....                           | 61 |
| Imagen 62: Circuito equivalente del generador de Marx en Simulink.....   | 61 |
| Imagen 63: Control de los breakers del modelo del generador de Marx..... | 62 |

# Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Resultados analíticos.....                      | 19 |
| Tabla 2: Resultados obtenidos en la simulación .....     | 20 |
| Tabla 3: Comparación de los datos y los resultados ..... | 20 |
| Tabla 4: Resultados medidos en el ensayo.....            | 28 |
| Tabla 5: Comparación de los datos y los resultados ..... | 28 |

# Memoria

Layla El kajouai Ben allal  
Curso 2020/2021



# 1. Introducción

Se dispone de un generador de impulsos tipo Marx el cual está instalado en el laboratorio de alta tensión situado en el Edificio Torres Quevedo de la EINA.

El objetivo principal del presente proyecto es adecuar la instalación para la realización de ensayos de impulso tipo rayo conforme a normativa, tanto desde el punto de vista de la seguridad como de la metrología.

Para ello, por una parte se han estudiado las características que presenta la instalación para poder evaluar los riesgos presentes y así tomar las medidas adecuadas de acuerdo a las normas que le son de aplicación [1]-[7]. De esta forma se asegura la protección de los trabajadores, estudiantes y público frente al riesgo eléctrico.

Una vez finalizado el estudio de seguridad se ha analizado el comportamiento de la señal cuando se conecta el circuito de medida al generador de Marx. Esto adquiere especial importancia dado que el impulso tipo rayo es un fenómeno transitorio y es necesario trabajar a frecuencias muy elevadas, lo que significa que habrá capacidades que alterarán la forma de onda. Este bloque se ha dividido en distintas etapas que se detallan a continuación.

- Se ha estudiado el generador para comprender su funcionamiento. En base a su principio de funcionamiento se ha obtenido el circuito equivalente de éste y se han realizado los cálculos pertinentes, detallados en el Anexo 6 y el Anexo 7, para obtener la función analítica que describe el comportamiento de la onda tipo rayo. Conociendo esa función se obtienen los tiempos teóricos que caracterizan la onda tipo rayo calculados en el Anexo 8. Para demostrar la validez de los cálculos analíticos se ha resuelto numéricamente el circuito equivalente utilizando Matlab. Posteriormente se han comparado los resultados con los ensayos realizados en el laboratorio.
- Se han estudiado las partes que componen el circuito de medida de forma separada con sus respectivos problemas derivados. Ver Anexo 9, Anexo 10 y Anexo 11. Finalmente se han comparado numéricamente en Matlab los resultados.

Con las medidas propuestas, al finalizar el proyecto el laboratorio podrá usarse en las condiciones de seguridad adecuadas. Por otro lado podrá medirse de forma correcta la onda tipo rayo.

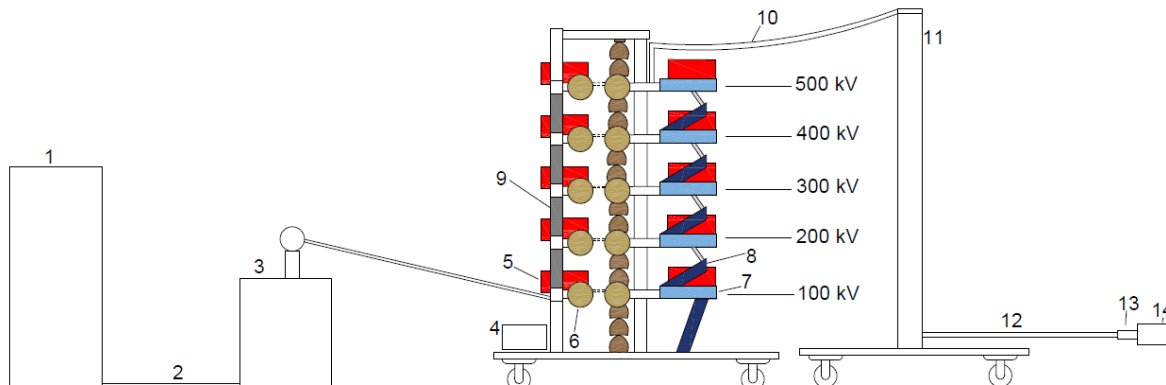
El Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3 y Anexo 5 hacen referencia a temas relacionados con la seguridad.

En el Anexo 4 se pueden encontrar fotos de la instalación.

El Anexo 12 representa el circuito equivalente junto con el circuito de medida.

## 2. Descripción de la instalación

La instalación está compuesta por un armario de control, un transformador, el trigatrón, la escalera de Marx, divisor de tensión capacitivo, divisor de tensión resistivo y osciloscopio.



**Imagen 1: Esquema de la instalación**

1. 1 Armario de control. 1. 2 Cable de conexión. 1. 3 Transformador + Rectificador. 1. 4 Trigatrón. 1. 5 Condensador. 1. 6 Explosor. 1. 7 Resistencia paralelo. 1. 8 Resistencia serie interna. 1. 9 Resistencia de carga. 1. 10 Resistencia serie externa. 1. 11 Divisor de tensión capacitivo. 1. 12 Cable coaxial. 1. 13 Atenuador. 1. 14 Osciloscopio

El armario de control está formado por 5 bloques operativos que permiten controlar el generador.

El bloque I permite la activación del armario mediante un interruptor el cual al ser accionado se ilumina una lámpara de señalización que indica la presencia de tensión en el armario (Imagen 6). Con una ruleta situada en el bloque T se regula el autotransformador que alimenta al transformador (1. 3), lo que hace posible regular la tensión que le entra a la escalera de Marx (Imagen 5). El bloque Z controla el disparo del trigatrón (Imagen 4), más abajo se explica su utilidad. En el bloque B se encuentran los contactores que permiten poner en tensión el transformador, desconectar los seccionadores de puesta a tierra de los cuales se hablarán más adelante, se puede seleccionar si se desea que el pulso sea positivo o negativo y la distancia de los explosores (Imagen 3). El bloque M dispone de un voltímetro y un amperímetro que miden a la salida del armario, hay otros dos medidores aparte, uno de ellos indica la tensión a la que estarán los explosores en función de la distancia y el otro indica el nivel de tensión a la que están cargados los condensadores (Imagen 2).



**Imagen 2: Bloque M del armario de control**



**Imagen 3: Bloque B del armario de control**



**Imagen 4: Bloque Z del armario de control**



**Imagen 5: Bloque T del armario de control**



**Imagen 6: Bloque I del armario de control**

La alimentación se realiza desde la red de 400 V a través del autotransformador (Imagen 5) que alimenta al transformador de 30 kVA, que puede elevar la tensión hasta 100 kV, posteriormente la señal se rectifica para cargar los condensadores del generador de impulsos.

La escalera de Marx tiene montadas 5 etapas de las cuales 3 están en funcionamiento, no obstante en el presente estudio se ha tenido en cuenta que las 5 etapas están o pueden estar operativas.

Cada etapa dispone de dos condensadores en serie (de 1,2  $\mu\text{F}$  cada uno) que se cargan a través de unas resistencias de carga (7 k $\Omega$  cada una), el valor que alcanzan los condensadores es de 50 kV cada uno. En el proceso de descarga los condensadores de todas las etapas se conectan en serie lo que hace que la tensión se eleve hasta los 500 kV.

La escalera está compuesta además por una resistencia serie interna (1. 8), de 5  $\Omega$ , y una resistencia paralelo (1. 7), de 115  $\Omega$ , por etapa que intervienen durante la descarga del impulso. Por otro lado, unas resistencias equipotenciales (de 1 M $\Omega$ ) distribuyen por igual la tensión en las etapas. La escalera de Marx está conectada a la columna divisora de tensión capacitiva (1. 11) por medio de una resistencia serie externa (1. 10), de 230  $\Omega$ .

Los explosores, permiten el paso de la corriente eléctrica cuando el trigatrón manda un pulso de 10 kV que inicia la descarga en el explosor de la primera etapa, lo que permite el paso de la corriente entre éstos provocando sucesivas descargas en las etapas posteriores.

Para la medida de la tensión, se utiliza el lado de baja del divisor capacitivo (de tensión nominal de 1 MV) que en el punto de medida da un valor de tensión 829 veces menor.

Las medidas se realizan con un osciloscopio el cual se ha conectado en el lado de baja tensión del divisor capacitivo a través de una etapa atenuadora (por 100).

En paralelo al divisor capacitivo se conecta el equipo a ensayar.

## 3. Evaluación de riesgos

Se han adoptado las medidas necesarias para que la utilización o presencia de la energía eléctrica en el lugar de trabajo no se deriven riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo. La adopción de estas medidas se ha basado en la evaluación de los riesgos contemplada en el artículo 16 de la Ley 31/1995, 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales y la sección 1ª del capítulo II del Real Decreto 39/1997, 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.

### 3.1. Condiciones de trabajo

Las condiciones de trabajo que se presentan en el laboratorio son las siguientes:

- Se trata de un laboratorio que está situado en el interior del edificio Torres Quevedo de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, código de sala C4-0-06. Ubicado a unos 220 m de altitud sobre el nivel del mar, en una atmósfera no explosiva ni combustible, los niveles de humedad y polvo son bajos, no se presentan temperaturas extremas.
- La instalación va a permanecer fija en el laboratorio, la alimentación del laboratorio de ensayos tipo impulso se realiza desde el cuadro de control ubicado en la sala de control, código C4-0-16, de la planta baja del Departamento de Ingeniería eléctrica. Se ha puesto una valla para proteger al personal de elementos en tensión que pueden ser accesibles, en el apartado 3.2. se explica en detalle.
- La instalación se compone de un armario de control desde el que se controla el generador. Un transformador permite elevar la tensión a 100 kV, posteriormente llega al generador de Marx en el cual hay o puede haber 500 kV. El impulso pasa a través de un divisor capacitivo que permite bajar la tensión hasta los 600 V. Un divisor resistivo permite atenuar la señal por 100 para ser finalmente registrada en un osciloscopio. Para un mayor nivel de detalle se puede acudir al apartado 2. En el Anexo 4 se pueden ver fotos de la instalación.
- En la instalación se emplean los dispositivos de mando ubicados en el armario de control que permiten realizar las maniobras mencionadas en el apartado 2, además, a la salida del generador se han conectado dispositivos de conversión que permiten reducir el nivel de tensión a un valor que se pueda registrar en el osciloscopio. Los equipos de medida empleados se ubican en el armario de control, en el Anexo 4 figuran fotos del armario.
- En el laboratorio aparecen niveles de alta tensión en la salida del transformador y entre bornes de los condensadores o entre estos y tierra si desde el armario de control se conecta el generador de impulsos y se sigue la secuencia adecuada (Anexo 2) para que pueda aparecer tensión en el generador de impulsos. Esto es debido a que la instalación se alimenta desde la red a través del armario de control. Por ello, la conexión del armario se realizará con la llave a disposición del personal cualificado para la ejecución de ensayos.
- Dadas las características de la instalación los riesgos que se podrían presentar son: Tocar de forma accidental elementos en tensión con la mano o con un objeto conductor (objeto de ensayo, condensadores cargados, manipulación de cables, estructuras y piezas metálicas), tocar elementos puestos accidentalmente en tensión (envolvente del armario de control o autotransformador, valla), desconectar la instalación y que haya una re-conexión sin que la persona responsable se dé cuenta, posicionarse en una zona cercana a los elementos en tensión provocando que salten arcos eléctricos, caídas o golpes con los objetos debido a choque eléctrico, manipular elementos de la instalación

estando ésta en tensión, que una persona ajena al laboratorio y sin formación conecte por accidente la instalación, que se efectúen de forma incorrecta la conexión y desconexión de la instalación, que no se siga adecuadamente el procedimiento para manipular la instalación.

- Si el equipo de ensayo está conectado, ha de evitarse cualquier actividad que se realice en el interior de la zona vallada dado que entonces se entra en la zona de proximidad a las fuentes de tensión. Por tanto, el acceso al interior debe garantizar la ausencia de tensión. El acceso al interior en algún momento va a ser necesario para, por ejemplo, la manipulación o sustitución de piezas, cables de la instalación o del objeto a ensayar.
- Acceder al interior de la instalación no es una actividad de riesgo si se consigue plena seguridad, es decir, que las fuentes de tensión estén desconectadas y puestas a tierra mientras el personal está en el interior.
- Acercarse a la instalación por el exterior de la valla para realizar u observar un ensayo no es una actividad de riesgo, dado que la valla asegura el distanciamiento de seguridad necesario.

Debido a los riesgos mencionados, se deben adoptar una serie de medidas preventivas conforme al Real Decreto 614/2001 las cuales están detalladas a continuación.

## **3.2. Medidas de seguridad**

### **3.2.1. Aspectos de la instalación**

La instalación eléctrica y las características de sus componentes se adaptan debidamente a las condiciones específicas del lugar, de la actividad desarrollada en él y de los equipos eléctricos que se utilizan, para ello se ha tenido en cuenta que se trata de un laboratorio que presenta niveles bajos humedad, no hay presencia de agua, la atmósfera no es explosiva dada la ausencia de químicos o materiales inflamables, el ambiente no es corrosivo y los niveles de polvo son muy bajos.

Los equipos eléctricos utilizados son compatibles con el tipo de instalación eléctrica existente y los factores ambientales mencionados anteriormente habiéndose comprobado con las características que proporciona el fabricante.

La instalación eléctrica del lugar de trabajo se utiliza y mantiene en la forma adecuada de acuerdo a una serie de procedimientos descritos en el Anexo 2 y el funcionamiento de los sistemas de protección se controla periódicamente, de acuerdo a las instrucciones de sus fabricantes y a la propia experiencia en el laboratorio.

La instalación eléctrica del lugar de trabajo, su uso y mantenimiento cumplen lo establecido en la reglamentación electrotécnica, la normativa general de seguridad y salud sobre lugares de trabajo, equipos de trabajo y señalización en el trabajo.

Se han diferenciado las distintas partes que componen la instalación en zona de generación, zona prohibida y zona de control [7] y se ha representado en un plano a modo ilustrativo en el apartado de los planos ubicado al final de este documento.

Una vez definidas las zonas, se ha delimitado la zona prohibida mediante una valla dada la presencia de tensión en la zona de generación durante los ensayos [7]. En el caso que se presenta se han considerado los valores para 500 kV. Se ha puesto una valla de 2,4 metros de altura con una distancia de separación de 100 mm con respecto al límite de la zona prohibida; la valla será de rejilla con una abertura de 12 mm como máximo. En el Anexo 1 está explicado el procedimiento para obtener las medidas anteriores y en el plano nº 3 se muestra la distancia entre la zona prohibida y la valla. Una vez instalada la valla, se conectan los elementos metálicos que la componen a tierra para evitar contactos indirectos.



Las ventanas del laboratorio, ubicadas en la zona prohibida, permanecen cerradas, asegurando su cierre con un candado.

La valla está equipada con una puerta de acceso a la zona de ensayos, la apertura de la puerta se realiza con llave. Para asegurar la desconexión de la instalación al abrir la valla, van unidas de forma inseparable la llave de la puerta de la valla y la de enclavamiento del sistema, de forma que, al retirar la llave de enclavamiento, se desconecta la alimentación del armario de control y, por tanto, la del generador de Marx. En el Anexo 4 hay una imagen de la seta que se ha empleado.

Además, la valla se ha equipado del siguiente automatismo: si la puerta de la valla está en posición abierta, se desconecta la alimentación del armario de control y, por tanto, la del generador de Marx, mediante un seccionador.

Tanto el armario de control como los instrumentos de medida están situados fuera de la zona peligrosa y dada la presencia de la valla no se puede acceder de forma accidental a una zona donde haya riesgo eléctrico.

La puerta del laboratorio debe estar debidamente señalizada, indicando la prohibición de entrada al personal no autorizado dada la presencia de alta tensión. Cuando en el laboratorio no hay personal de servicio, la puerta permanece cerrada bajo llave de forma que se impide la entrada del personal no autorizado.

La apertura del armario de control y demás envolventes de material eléctrico está restringida a trabajadores autorizados.

### 3.2.2. Técnicas y procedimientos

Las técnicas y procedimientos empleados para trabajar en la instalación eléctrica, se han establecido teniendo en consideración:

- La evaluación de los riesgos que el trabajo pueda suponer, habida cuenta de las características de la instalación, del propio trabajo y del entorno en el que va a realizarse.
- Los requisitos establecidos en las secciones siguientes del presente apartado.

Durante los ensayos la instalación permanece en tensión, por ello todo el personal debe permanecer en la zona exterior, la zona de control. Cuando se quiera entrar a la zona prohibida la instalación debe permanecer sin tensión y para ello se deben seguir los pasos que se detallan a continuación.

#### Trabajos sin tensión

Las operaciones y maniobras para dejar sin tensión la instalación, antes de iniciar el trabajo y la reposición de la tensión, al finalizarlo, las realizará un trabajador cualificado.

Cuando se proceda a entrar a la zona prohibida se deben cumplir los siguientes pasos:

- **Desconectar:** El generador de impulsos debe estar desconectado, su desconexión de la alimentación se realiza desde el armario de control, siguiendo la secuencia específica en el procedimiento de desconexión en el Anexo 2. Los condensadores se descargan debidamente después de la desconexión a través de dos resistencias de 7 k $\Omega$  que han sido adecuadamente dimensionadas para las características de la instalación. Si alguien pretendiera entrar sin cumplir este requisito debe coger la llave de la seta, lo cual desconecta automáticamente la instalación y pone a tierra los condensadores, produciéndose su descarga. En el proceso de desconexión se deben cortocircuitar los extremos del condensador juntando unas esferas que forman parte de la instalación.

- **Enclavamiento:** Para prevenir cualquier posible realimentación se emplea una seta de emergencia con llave incorporada. Retirada la llave, la seta se acciona y bloquea completamente el armario de control, imposibilitando la reactivación del sistema aunque se pulsen los interruptores. Como medida adicional se recomienda colocar una señal en la que se prohíba maniobrar los dispositivos mientras la llave no esté en la seta.
- **Verificar la ausencia de tensión:** La ausencia de tensión se verifica debidamente a través del armario de control en el cual hay un voltímetro y un amperímetro para medir el elemento activo de la instalación. El correcto funcionamiento de los dispositivos queda verificado durante los ensayos dado que se controla en todo momento la tensión que hay en el elemento activo, de forma que si marca cero al activar la alimentación se sabe con certeza que hay un fallo en los dispositivos de medida.

Como medida adicional está instalada una señal de tipo luminoso para indicar que ya no es seguro permanecer cerca de la instalación en el momento en el que las varillas de puesta a tierra se abren (luz roja intermitente) y cuando hay tensión (luz roja fija).

- **Poner a tierra y en cortocircuito:** Cuando se desconecta la instalación, automáticamente los condensadores son puestos a tierra y el circuito de alimentación de los mismos es interrumpido con corte visible. La puesta a tierra de los condensadores garantiza su descarga. Aunque no es necesario, por redundancia se empleará una pértiga de puesta a tierra debidamente conectada a tierra mediante abrazadera para asegurar su conexión, durante todo momento la conexión es visible desde la zona de trabajo. Los conductores utilizados para efectuar la puesta a tierra y el cortocircuito se han dimensionado para tener la sección suficiente para la corriente de cortocircuito de la instalación.

Una vez completadas las cinco etapas, se autoriza el inicio del trabajo sin tensión dentro de la zona delimitada por la valla metálica.

Cuando se efectúe la reposición de condiciones de servicio del generador de impulsos, después de que se hayan retirado todos los trabajadores y que se hayan recogido de la zona de trabajo las herramientas y equipos utilizados, se inicia el proceso de reposición de las condiciones de servicio del generador de impulsos.

El proceso de reposición comprende los siguientes pasos:

- Retirada de la puesta a tierra y el cortocircuito.
- Volver a colocar la llave en la seta.

De esta forma el generador de impulsos queda en condiciones de servicio, para su desconexión se seguirá el procedimiento descrito en el Anexo 2.

#### Maniobras, mediciones, ensayos y verificaciones eléctricas

Al tratarse de una instalación de alta tensión, las mediciones, ensayos y verificaciones con el generador de impulsos podrán ser realizados solo por personal cualificado, pudiendo ser auxiliados por trabajadores autorizados, bajo su supervisión y control.

Se entiende como trabajador autorizado aquel que ha sido autorizado por el empresario para realizar determinados trabajos con riesgo eléctrico, en base a su capacidad para hacerlos de forma correcta [2].

Un trabajador cualificado es un trabajador autorizado que posee conocimientos especializados en instalaciones eléctricas debido a su formación acreditada, profesional o universitaria, o a su experiencia certificada de dos o más años [2].

El método de trabajo empleado y los equipos y materiales de trabajo y de protección utilizados protegen debidamente al trabajador frente a los riesgos mencionados en el apartado 3.1.

Los equipos y materiales de protección son:

- Se emplean botas de seguridad en el interior de la valla dada la posibilidad de darse golpes con alguna parte metálica. En el exterior, la zona de control, no es obligatorio dado que se trata de un área libre de obstáculos.
- Se emplean guantes aislantes cuando hay que manipular el circuito de medida, es decir, a la salida del divisor de tensión capacitivo como medida de seguridad adicional [3].

A efectos de lo dispuesto antes, los equipos y materiales de trabajo o de protección empleados para la realización de las operaciones se han elegido de entre los concebidos para tal fin, teniendo en cuenta las características del trabajo y, en particular, la tensión de servicio, y se utilizarán, mantendrán y revisarán siguiendo las instrucciones de su fabricante. En cualquier caso, los equipos y materiales para la realización de las operaciones se ajustan a la normativa específica que les sea de aplicación.

La iluminación dispone de los niveles adecuados que permite a los trabajadores realizar su trabajo en condiciones de visibilidad adecuadas.

Maniobras en el armario de control:

- El método de trabajo empleado prevé tanto los defectos razonablemente posibles de los aparatos, como la posibilidad de que se efectúen maniobras erróneas para ello se ha escrito un procedimiento de trabajo en el Anexo 2 para la conexión/desconexión de la instalación a través del armario de control y los pulsadores están claramente identificados.
- Para la protección frente al riesgo de arco eléctrico, no es obligatoria la utilización de equipos de protección en la zona de control dado que está totalmente protegido frente al riesgo por medio de la valla.

### **3.3. Disposiciones particulares**

En lo relativo a la instalación eléctrica:

- La instalación eléctrica del lugar de trabajo se ajusta debidamente a lo dispuesto en las normas que le son de aplicación.
- Dadas las características del laboratorio, la instalación eléctrica no entraña riesgos de incendio o explosión. Estos deberán ser considerados si el equipo a ensayar sí entraña riesgos de incendio o explosión.
- Los trabajadores están debidamente protegidos contra los riesgos de accidente causados por contactos directos dado que la instalación está protegida con una valla y el personal no puede acceder a elementos en tensión durante la ejecución de los ensayos, para evitar los contactos indirectos debidos a masas puestas accidentalmente en tensión, se ha puesto a tierra la valla y la carcasa metálica del armario de control el cual es maniobrado por el personal cualificado durante los ensayos.
- La instalación eléctrica y los dispositivos de protección empleados se han instalado teniendo en cuenta la tensión, los factores externos condicionantes y la competencia de las personas que tengan acceso a partes de la instalación.

El resto de prescripciones que le son de aplicación a la instalación se cumplen conforme lo establecido en el Real Decreto 485/1997 [5].



Las señales que se han empleado son las siguientes:

- Puerta de entrada de laboratorio: Señal de advertencia; *“Prohibido el paso, instalación de ensayos de alta tensión”*; Color de pictograma: Negro; Color de fondo: Amarillo; Forma: Triangular.
- Puerta de la valla: Señal de advertencia; *“Riesgo eléctrico”*; Color de pictograma: Negro; Color de fondo: Amarillo; Forma: Triangular.
- Cerca de la puerta de la valla: Señal de obligación de uso de equipos de protección; Color de pictograma: Blanco; Color de fondo: Azul; Forma: Circular.

Se han representado los pictogramas antes mencionados en el Anexo 5.

## 4. Estudio teórico

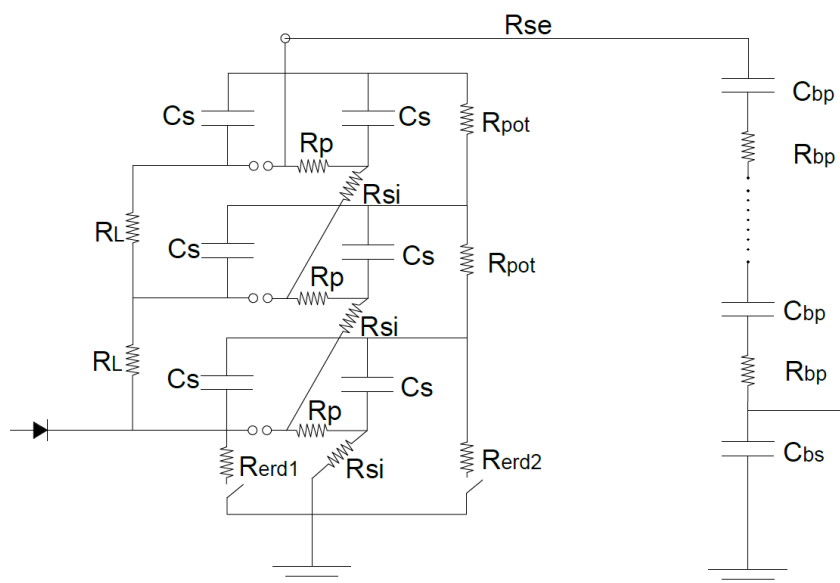
### 4.1. Introducción

El generador de Marx puede generar tanto impulsos tipo rayo como tipo maniobra, la diferencia entre ambos está en la elección de las resistencias serie ( $R_s$ ) y paralelo ( $R_p$ ) cuando se diseña la instalación. En el presente informe se ha basado el estudio únicamente en el impulso tipo rayo, siendo las conclusiones también aplicables al impulso tipo maniobra.

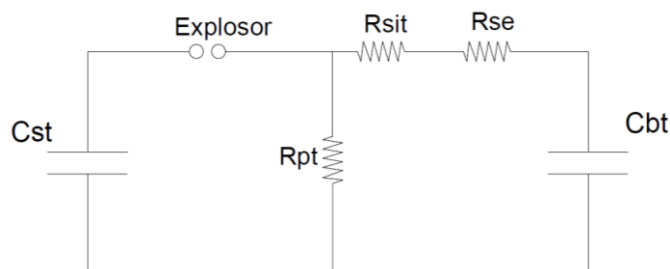
La necesidad de medir bien el impulso tipo rayo es de esencial importancia para poder utilizar la instalación en los ensayos de impulso de aparata de alta tensión descritos en la normativa.

### 4.2. Modelo equivalente

El generador de impulsos se puede encontrar en cuatro posibles configuraciones dependiendo de cómo se conectan las etapas de la escalera de Marx durante la descarga [9]. El caso que se va a estudiar es un acoplamiento serie en el que los condensadores de las diferentes etapas se conectan en serie durante la generación de la descarga. A partir de esta configuración, Imagen 7, se reduce el circuito genérico para llegar a un modelo equivalente simplificado. En el Anexo 6 se puede encontrar el proceso hasta llegar al circuito equivalente de la Imagen 8.



**Imagen 7: Circuito genérico de la escalera de Marx + Divisor capacitivo**



**Imagen 8: Circuito equivalente generador de Marx**

El circuito equivalente muestra el generador en el momento en el que se va a producir el impulso, es decir, los condensadores de la escalera de Marx,  $C_{st}$  a partir de ahora, ya se han cargado previamente. En el presente proyecto no entra dentro del estudio el proceso de carga de  $C_{st}$ . El impulso tipo rayo es la caída de tensión vista en la columna divisora de tensión,  $C_{bt}$ .

El impulso inicia en el momento en el que parte de la carga de  $C_{st}$  se transfiere a  $C_{bt}$  a través de las resistencias serie interna y externa,  $R_{sit}$  y  $R_{se}$  respectivamente. Posteriormente,  $C_{st}$  y  $C_{bt}$  se descargan a través de  $R_{pt}$ . En el apartado 4.3 se va a describir en detalle el impulso tipo rayo.

Los valores nominales de la instalación son los que siguen:

- Escalera de Marx (Valores por etapa)
  - $C_s = 1,2 \mu F$
  - $R_p = 115 \Omega$
  - $R_{si} = 5 \Omega$
  - $R_{se} = 230 \Omega$
  - $R_{erd1} = 7 k\Omega$
  - $R_{erd2} = 7 k\Omega$
  - $R_L = 7 k\Omega$
  - $R_{pot} = 1 M\Omega$
- Divisor (primario)
  - $C_{bp} = 36 nF$ , hay 25 condensadores en serie  $\rightarrow C_{bp \text{ total}} = 1440 pF$
  - $R_{bp} = 3,33 \Omega$ , hay 24 resistencias en serie  $\rightarrow R_{bp \text{ total}} = 80 \Omega$
- Divisor (secundario)
  - $C_{bs} = 1,2676 \mu F$
- Circuito equivalente
  - $R_{sit} = N \cdot R_{si}$
  - $R_{pt} = R_p \cdot N$
  - $R_s = R_{sit} + R_{se}$
  - $C_{st} = C_s / N'$
  - $C_{bt} = (C_{bp \text{ total}} \cdot C_{bs}) / (C_{bp \text{ total}} + C_{bs})$
  - $N = 3$  (3 etapas)
  - $N' = 6$  (3 etapas, 2 condensadores por etapa)
- Tensión máxima por etapa: 100 kV

### 4.3. Descripción de la onda

El impulso tipo rayo se caracteriza por dos valores temporales que se escriben de la forma 1,2/50  $\mu s$  tal y como lo define la norma UNE 60060 -1. El primer término se denomina tiempo de frente ( $T_1$ ) “parámetro virtual definido como 1/0,6 veces el intervalo T entre los instantes en los que el impulso alcanza el 30 % y el 90 % del valor de cresta de la curva de la tensión de ensayo” [8]. El segundo término se denomina tiempo hasta valor mitad ( $T_2$ ) “parámetro virtual que se define como el intervalo de tiempo entre el origen virtual y el instante en que la curva de tensión de ensayo ha bajado hasta la mitad del valor de la tensión de ensayo” [8]. En la Imagen 9 se representan los tiempos ( $T_1$ ) y ( $T_2$ ). El origen virtual  $O_1$  se define como el punto de intersección de la recta que pasa por los puntos A y B y el eje de abscisas.

Los tiempos de frente y tiempo hasta valor mitad presentan unos márgenes de tolerancia que se emplearán más adelante [8].

- Tiempo de frente:  $\pm 30 \%$
- Tiempo hasta valor mitad:  $\pm 20 \%$

La curva de impulso se puede descomponer en dos funciones exponenciales como se puede ver en la Imagen 10. La exponencial de color verde representa la etapa en la que el condensador  $C_{st}$  transfiere parte de su carga al condensador  $C_{bt}$  a través de  $R_s$ , tiempo en el que el impulso crece hasta su valor máximo. La exponencial de color rojo representa la descarga de  $C_{bt}$  a través de  $R_{pt}$ , en ese momento la curva de impulso comienza a descender. Las exponenciales se obtienen a partir de la función que describe el comportamiento del impulso (1), en esa función se puede observar que el signo de la curva verde es negativo.

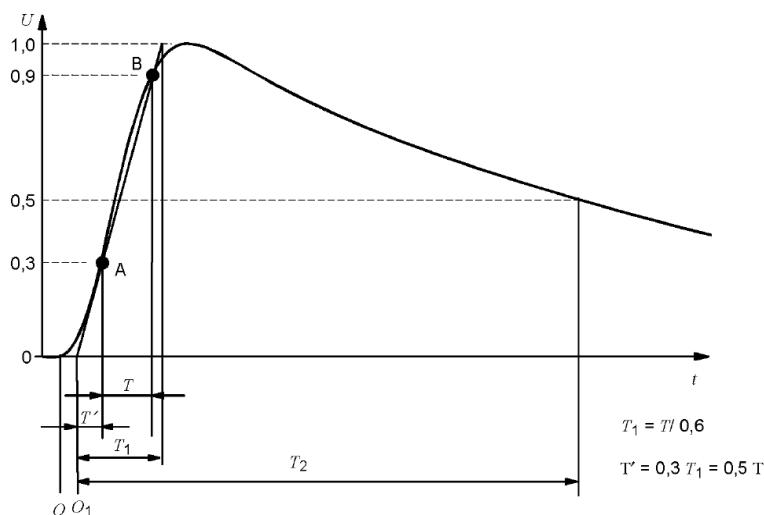


Imagen 9: Representación de los parámetros temporales del impulso tipo rayo [8].

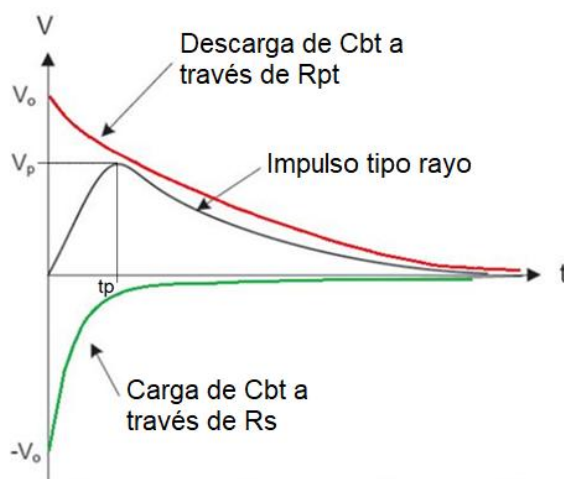


Imagen 10: Representación de la carga y descarga de  $C_{bt}$  con dos exponenciales [10].

#### 4.4. Análisis matemático

Dado que el objetivo es obtener  $T_1$  y  $T_2$ , se ha planteado un modelo matemático basado en el circuito equivalente del apartado 4.2. La función resultante representa el comportamiento de la caída de tensión en  $C_{bt}$ .

$$V_{C_{bt}}(t) = \frac{V_p}{2 \cdot R_s \cdot C_{bt} \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} - e^{-(\alpha+\beta) \cdot t}) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{a}{2} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{R_{pt} \cdot C_{st}} + \frac{1}{R_s \cdot C_{st}} + \frac{1}{R_s \cdot C_{bt}} \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{R_{pt} \cdot R_s \cdot C_{st} \cdot C_{bt}} \quad (5)$$

Donde:

$V_p$ : Tensión de pico del impulso.

$R_s$ : Resistencia serie del circuito equivalente.

$C_{bt}$ : Capacidad del divisor capacitivo equivalente.

$\alpha$ : Parámetro que depende de los elementos del circuito equivalente.

$\beta$ : Parámetro que depende de los elementos del circuito equivalente.

A partir de (1), se han calculado las ecuaciones que permiten obtener los tiempos en los que se alcanza el valor de pico ( $t_p$ ), el 30% del valor de pico ( $t_{30}$ ), el 50 % del valor de pico ( $t_{50}$ ) y 90% del valor de pico ( $t_{90}$ ). Para un mayor nivel de detalle se pueden encontrar los cálculos en el Anexo 8.

$$t_p = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \ln\left(\frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}\right) \quad (6)$$

$$t_{30} = \frac{\ln(0,7 \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p})}{-(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

$$t_{50} = \frac{\ln(0,5 \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p})}{-(\alpha - \beta)} \quad (8)$$

$$t_{90} = \frac{\ln(0,1 \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p})}{-(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

$$t_{01} = t_{30} - 0,3 \cdot T_1 \quad (10)$$

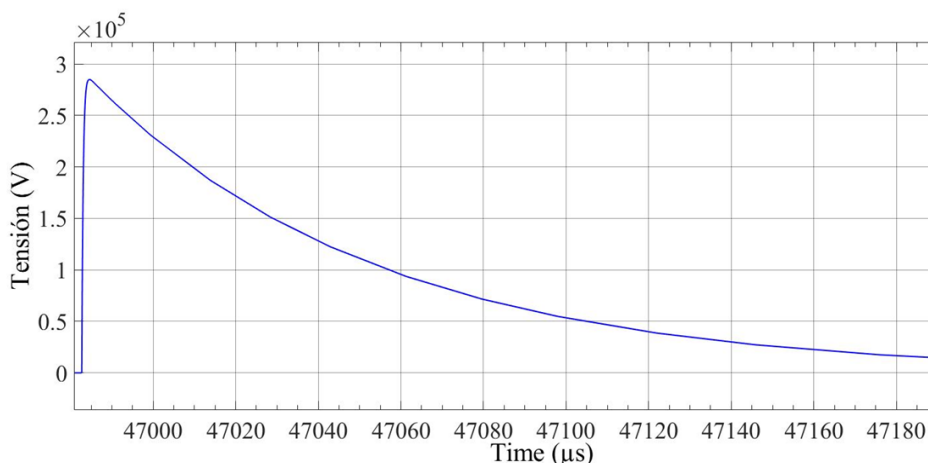
A partir de los datos de la instalación (apartado 4.2) y con las ecuaciones (2) - (10) se han obtenido los tiempos necesarios para obtener  $T_1$  y  $T_2$ . Con esos tiempos y (1) se ha calculado la tensión correspondiente.  $V_p$  es la tensión máxima del impulso,  $V_{30}$  es el 30 % de la tensión máxima,  $V_{90}$  es el 90 % de la tensión máxima y  $V_{50}$  es el 50 % de la tensión máxima.

**Tabla 1: Resultados analíticos**

| Tiempo ( $\mu$ s)       |              | Tensión (V)             |               |
|-------------------------|--------------|-------------------------|---------------|
| $t_p$                   | 1,86         | $V_p$                   | 289978        |
| $t_{30}$                | 0,13         | $V_{30}$                | 94764         |
| $t_{90}$                | 0,81         | $V_{90}$                | 266719        |
| <b><math>T_1</math></b> | <b>1,13</b>  | <b><math>V_1</math></b> | <b>282820</b> |
| $t_{01}$                | -0,21        | $V_{01}$                | 0             |
| $t_{50}$                | 50,03        | $V_{50}$                | 145722        |
| <b><math>T_2</math></b> | <b>50,24</b> | <b><math>V_2</math></b> | <b>145291</b> |

#### 4.5. Simulación en Simulink

Para verificar los resultados analíticos obtenidos en el apartado 4.4 se ha modelado el generador de Marx en Simulink obteniendo la curva de la Imagen 11.



**Imagen 11: Simulación en Simulink de la tensión  $V_{Cbt}$**

El inicio del impulso (Imagen 11) se da cuando la simulación lleva 46,983 s, al buscar los valores temporales  $t_p$ ,  $t_{30}$ ,  $t_{90}$  y  $t_{50}$  se ha tenido eso en cuenta de forma que los datos de la Tabla 2 se han obtenido usando como origen 46,983 s.

En este caso el valor de partida es  $V_p$  con el que se pueden obtener  $V_{30}$ ,  $V_{90}$  y  $V_{50}$ . Con esas tensiones se pueden obtener los respectivos valores temporales para posteriormente calcular  $T_1$  y  $T_2$ .

**Tabla 2: Resultados obtenidos en la simulación**

| Tensión (V) |        | Tiempo ( $\mu$ s) |              |
|-------------|--------|-------------------|--------------|
| $V_p$       | 284300 | $t_p$             | -            |
| $V_{30}$    | 85290  | $t_{30}$          | 0,12         |
| $V_{90}$    | 255870 | $t_{90}$          | 0,75         |
| $V_1$       | -      | $T_1$             | <b>1,05</b>  |
| $V_{O1}$    | 0      | $t_{O1}$          | -0,20        |
| $V_{50}$    | 142150 | $t_{50}$          | 49,88        |
| $V_2$       | -      | $T_2$             | <b>50,08</b> |

**Tabla 3: Comparación de los datos y los resultados**

|                  | Valores nominales | Resultados analíticos | Error (%) | Resultados de Simulación | Error (%) |
|------------------|-------------------|-----------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| $V_p$ (V)        | 300000            | 289978                | 3,34      | 284300                   | 5,23      |
| $T_1$ ( $\mu$ s) | 1,2               | 1,13                  | 5,83      | 1,05                     | 12,5      |
| $T_2$ ( $\mu$ s) | 50                | 50,24                 | 0,48      | 50,08                    | 0,16      |

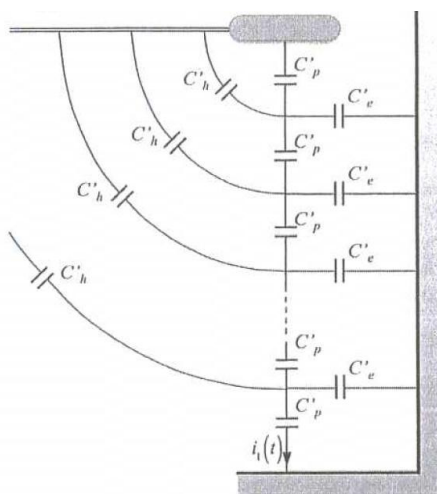
Los resultados teóricos de  $T_1$  y  $T_2$  se aproximan bastante a los datos que proporciona la norma, esto da una idea de cómo se comportará el generador de Marx cuando se haga un ensayo. En el caso de la simulación, el error de  $T_1$  es algo elevado, esto puede deberse a que el modelo usado para los explosores de cada etapa es un “Breaker” (interruptor). En el apartado 5 se hará una comparación con las medidas experimentales.

Una vez conocido el comportamiento de la forma de onda, se va a explicar, en los siguientes apartados, los distintos elementos que aparecen en el circuito de medida. Éstos afectarán en los resultados debido a la frecuencia en la que se trabaja, del orden de los MHz. Para ello se va a estudiar el comportamiento de los componentes y se va a ofrecer una solución que permita corregir los problemas.

#### 4.6. Divisor de tensión capacitivo

El divisor de tensión capacitivo está formado por 25 condensadores en el lado de alta y 1 condensador en el lado de baja. Además, se añaden 24 resistencias en el lado de alta en serie con los condensadores. El objetivo de poner esa cantidad de elementos es para adecuar el divisor capacitivo a los valores de capacidad y resistencia que se definen en el documento [9]. Mediante los condensadores se consigue una relación de transformación 300 kV/360 V [9], las resistencias son de amortiguamiento y su único papel en el divisor es para amortiguar las oscilaciones debidas a inductancias parásitas [11].

Otro problema que aparece en los divisores capacitivos son las capacidades parásitas, estas son de 3 tipos, capacidad hasta alta tensión,  $C'_h$ ; capacidad a tierra,  $C'_e$  y capacidad entre elementos del componente  $C'_p$ , en la Imagen 12 se representan las capacidades mencionadas.



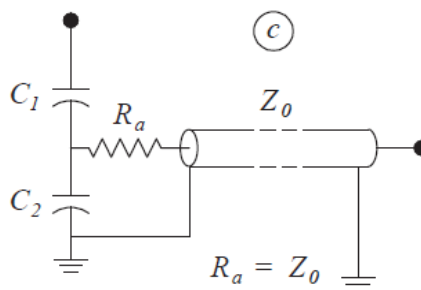
**Imagen 12: Distribución de capacidades parásitas en el divisor capacitivo [11].**

Las capacidades  $C_h$  y  $C_p$  son despreciables si se apantalla adecuadamente el divisor capacitivo [11] por lo que solo queda  $C_e$ . En el presente estudio no se entra en detalles de cómo reducir los efectos de las capacidades parásitas dado que el divisor capacitivo es uno comercial de la marca HAEFELY, donado por la empresa ABB [9].

#### 4.7. Cable coaxial

Para transmitir la señal del impulso hasta el osciloscopio se ha empleado un cable coaxial, de impedancia característica  $75 \Omega$ . El cable coaxial presenta buenas características respecto a la inmunidad al ruido, lo que lo hace ideal para el circuito de medida, no obstante, se debe tener cuidado en los puntos de conexión dado que una inadecuada conexión puede alterar las medidas.

Inicialmente se adaptó la impedancia en los puntos de conexión tanto a la entrada como a la salida del cable pero esto produjo un problema en las medidas experimentales de las que se habla en el apartado 4.8. Según la norma IEEE [12], dado que se está trabajando con un divisor capacitivo, se debe adaptar la impedancia solo a la entrada del cable. A la salida se deben conectar dispositivos con una impedancia lo más grande posible para poder conseguir una medida fiable. En la Imagen 13 la resistencia  $R_a$  debe tener la misma impedancia que la del cable.



**Imagen 13: Adaptación de impedancia a la entrada del cable coaxial [12].**



## 4.8. Sondas de medida

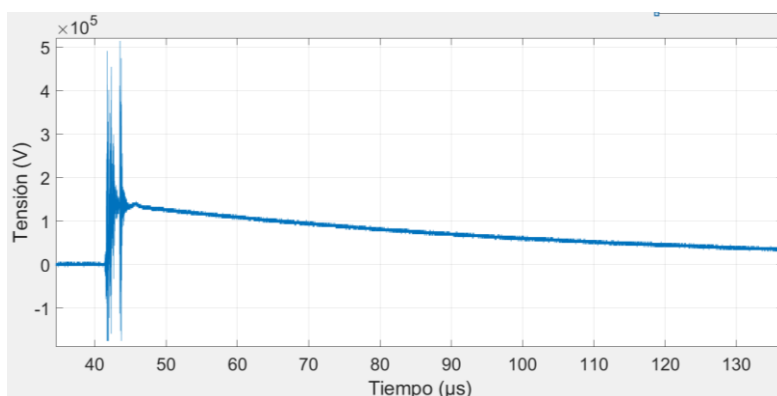
A la salida del divisor de tensión capacitivo la tensión es de 360 V cuando en el primario hay 300 kV, en el caso de los 500 kV la tensión de salida llegaría a los 600 V. Las medidas se realizan con un osciloscopio y dados los valores mencionados antes, se debe emplear una sonda atenuadora o atenuador para que sea posible medir la forma de onda en el osciloscopio.

Es importante elegir una adecuada sonda de medida dado que van a intervenir varios factores que pueden alterar la medida. La sonda o el atenuador deben tener suficiente ancho de banda dado que el impulso tipo rayo tiene un tiempo de subida muy rápido, si el ancho de banda es muy bajo se estará perdiendo parte de la señal. La tensión que es capaz de soportar la sonda o el atenuador es otro factor a tener en cuenta. El impulso tipo rayo emite ondas electromagnéticas, estas ondas provocan ruido en la medida de modo que para evitarlo el atenuador debe tener apantallamiento. Finalmente, habrá que fijarse en la impedancia de entrada del atenuador para conseguir una medida fiable.

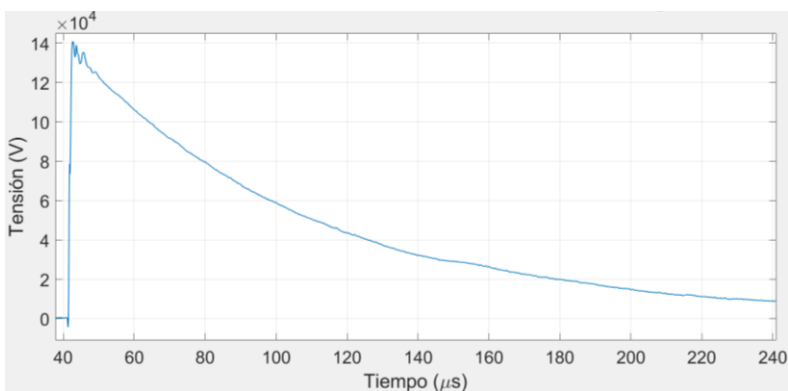
### Sonda diferencial

La sonda tiene 4 M $\Omega$  de impedancia de entrada, 3 posiciones para atenuar (x20, x50, x200) y un ancho de banda de 25 MHz.

En la medida con la sonda diferencial (Imagen 14) se observan perturbaciones de alta frecuencia en el inicio del impulso, esto puede deberse al elevado ancho de banda, que capta componentes de alta frecuencia que alteran la señal. Se filtró la señal con un filtro paso bajo de Respuesta de Impulso Infinito (frecuencia de corte = 1 MHz; atenuación de 60 dB en 63,45 MHz) programado en Matlab obteniendo la señal mostrada en la Imagen 15, la cual está libre de armónicos de alta frecuencia.



**Imagen 14: Medida con sonda diferencial antes del filtrado**



**Imagen 15: Medida con sonda diferencial filtrada**



**Imagen 16: Sonda diferencial**

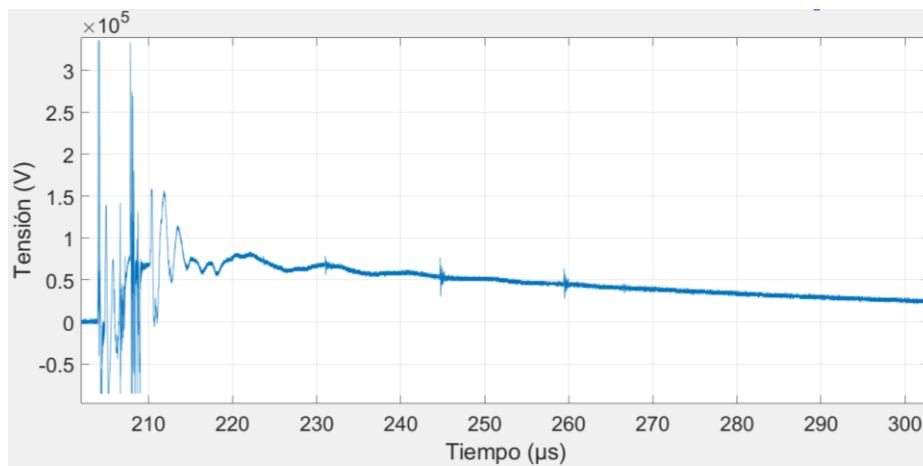
### Sonda Tektronix TPP0250

Esta sonda tiene alta impedancia a la entrada, atenúa por 10 y tiene un ancho de banda de 250 MHz.

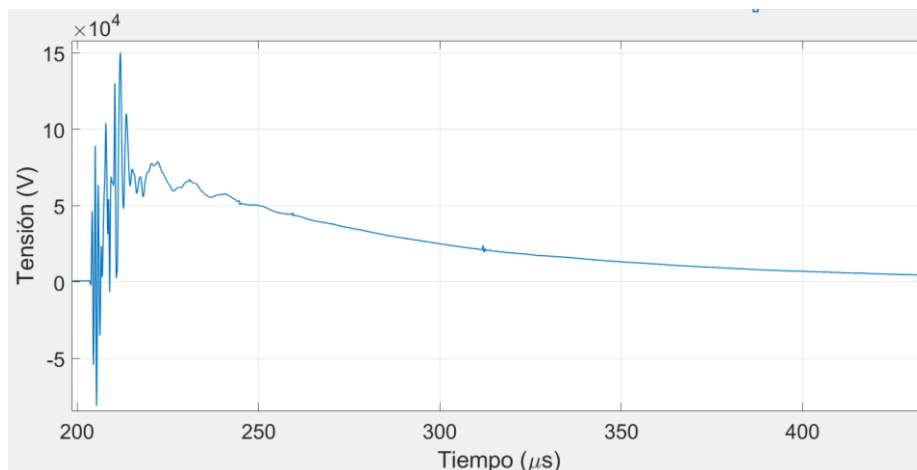
Nuevamente, se observan perturbaciones de alta frecuencia al inicio del impulso tipo rayo (Imagen 18). Igual que en el caso anterior, puede deberse a un elevado ancho de banda. La forma de onda mejora después de aplicar el filtro paso bajo de Respuesta de Impulso Infinito (frecuencia de corte = 1 MHz; atenuación de 60 dB en 63,45 MHz), no obstante, sigue habiendo armónicos que alteran la medida.



**Imagen 17: Sonda Tektronix TPP0250**



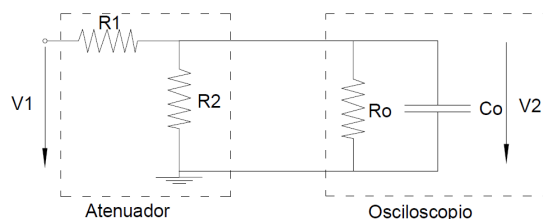
**Imagen 18: Medida con sonda Tektronix TPP0250 antes del filtrado**



**Imagen 19: Onda tipo rayo con sonda Tektronix TPP0250**

### Atenuador casero

Se diseñó un atenuador a partir de dos resistencias que permitía dividir la tensión por 100. Para bajas frecuencias el atenuador cumple su función, no obstante, en el rango de frecuencias en el que se trabaja, el osciloscopio tiene una capacidad parásita que hay que tener en cuenta en el diseño. El circuito es el mostrado en la Imagen 20.

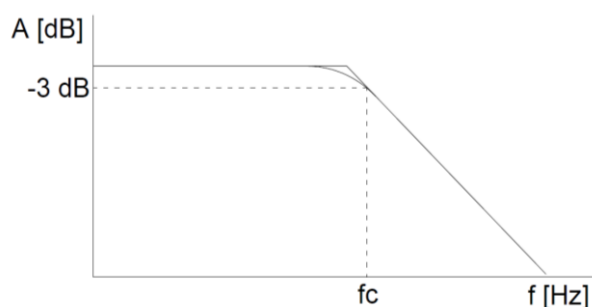


**Imagen 20: Circuito atenuador + osciloscopio a alta frecuencia**

Dada la presencia de esa capacidad, se ha obtenido la función de transferencia (11) para observar el comportamiento del sistema. La función de transferencia revela que el circuito constituye un filtro paso bajo como se puede observar en la Imagen 21.

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_o}}{1 + \frac{R_1 \cdot R_o \cdot C_o \cdot R_2}{R_2 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_o} S} \quad (11)$$

Es importante no superar la frecuencia de corte (para la que la amplitud se reduce a un 70,7 %, es decir 3 dB, dado que todas las componentes frecuenciales que superen ese valor estarán atenuadas en exceso, resultando una medida alterada que no se corresponde con la real. En la Imagen 21 se ve el punto donde corta la frecuencia [13].



**Imagen 21: Filtro paso bajo**

En el Anexo 9, se calcula que la frecuencia de corte vale 811 kHz que es un valor excesivamente bajo, es decir, si se hicieran medidas con el atenuador se obtendría una medida alterada en la que las frecuencias más elevadas estarían atenuadas por un factor mayor que 100. Es posible elevar la frecuencia de corte añadiendo un condensador que permita compensar la capacidad del osciloscopio, para ello es necesario conocer el modelo del osciloscopio para poder hacer una correcta adaptación. En el Anexo 9 se puede encontrar un análisis más detallado para poder resolver el problema del filtro así como simulaciones hechas en Simulink. Finalmente se descartó este atenuador dado que llevaría mucho tiempo diseñarlo. Además, en el mercado se pueden encontrar modelos interesantes con los que se puede obtener una buena medida.

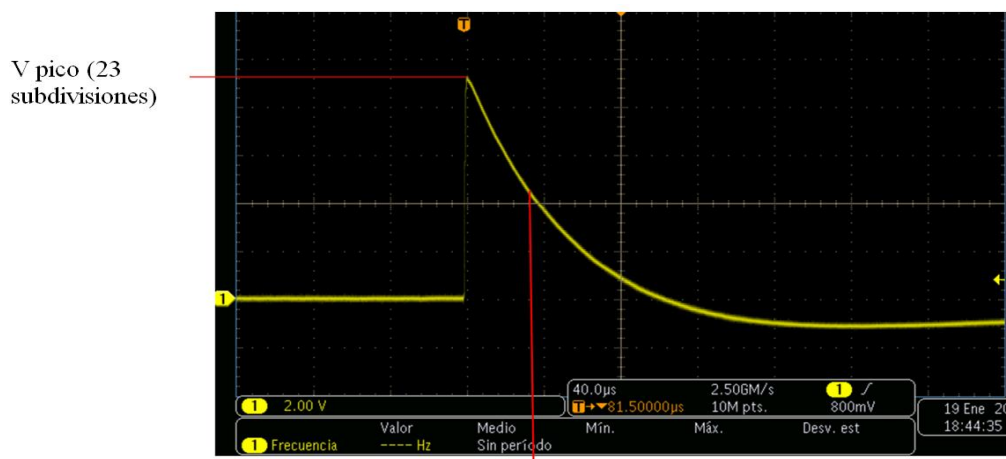
#### Atenuador de baja impedancia a la entrada

Este atenuador tiene un ancho de banda de 1 GHz. En este caso la impedancia de entrada del atenuador es de  $50 \Omega$  y la atenuación por 10, Imagen 22.



**Imagen 22: Atenuador de baja impedancia de entrada**

En la Imagen 23, se puede observar uno de los ensayos de impulso tipo rayo realizados con el atenuador. El tiempo  $T_2$  no cumple con la norma dado que la curva desciende muy rápido, en 32  $\mu\text{s}$  ya llega a la mitad del valor máximo de la tensión. Una posibilidad es que sea debido a que el atenuador presenta una baja impedancia de entrada. Al tener un elevado ancho de banda deberían aparecer armónicos de alta frecuencia, no obstante, es posible que el ancho de banda sea mucho menor a 1 GHz debido al rango de tensiones en el que se está trabajando. Finalmente esta opción se descartó.



$T_2$  (4 subdivisiones con respecto a origen, 32  $\mu\text{s}$ )

**Imagen 23: Impulso tipo rayo con atenuador de baja impedancia**

### Sonda Testec TT-HV 251 de 2.5 kVp

La sonda (Imagen 24) presenta una impedancia de entrada de  $100\text{ M}\Omega$  y  $6\text{ pF}$ . Se comporta como un filtro pasa baja cuyo ancho de banda depende de la tensión y, a los valores de tensión de trabajo, es en torno a  $10\text{ MHz}$ . La sonda atenúa por 100 y consigue medidas de calidad de la onda de tensión tipo rayo como se puede apreciar en la Imagen 25 o en la Imagen 26, por lo que las medidas finales que se analizan a continuación, se realizan con esta sonda.



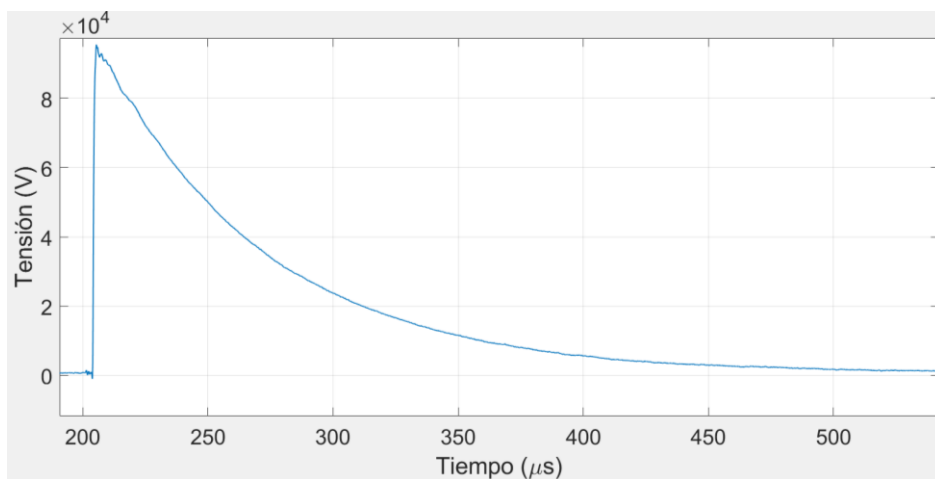
**Imagen 24: Sonda Testec TT-HV 251 de 2.5 kVp**

En el Anexo 10 se puede encontrar más en detalle las características de las sondas descritas en este apartado.

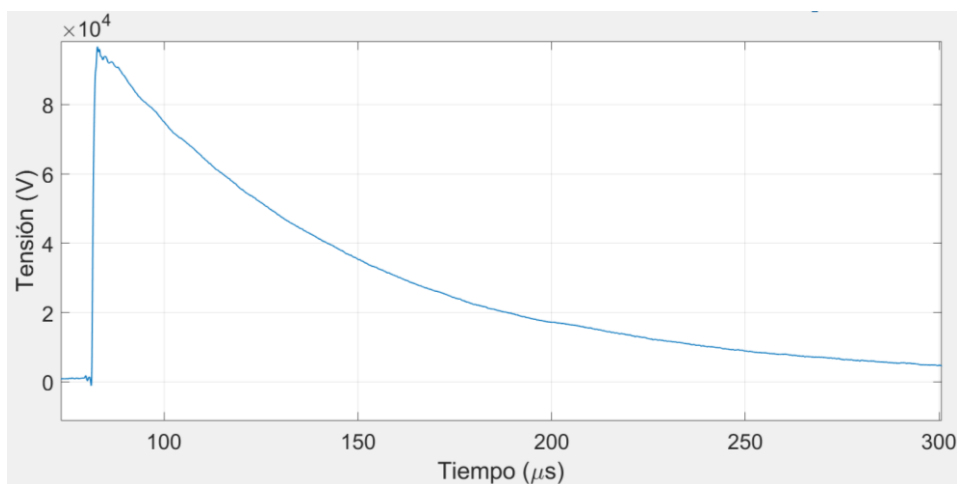
## 5. Medidas experimentales

Como se acaba de indicar, para las medidas experimentales se propone el empleo de la sonda Testec TT-HV 251 junto con el osciloscopio Tektronix MDO 3024 (200 MHz) que permite el registro de la señal impulso tipo rayo.

Se han realizado varias medidas con la misma sonda, de estas se han considerado las mostradas en la Imagen 25 e Imagen 26 al objeto de comparar entre ellas, con los resultados analíticos y los obtenidos por simulación. A partir de los datos registrados se obtiene el valor de  $V_p$ , posteriormente se calculan  $V_{30}$ ,  $V_{50}$  y  $V_{90}$  para poder conocer  $t_{30}$ ,  $t_{50}$  y  $t_{90}$ . Finalmente se calcula  $T_1$  y  $T_2$  (Anexo 13). Los valores que se obtienen para los ensayos mostrados en Imagen 25 e Imagen 26 se muestran en la Tabla 4.



**Imagen 25: Medida experimental del impulso tipo rayo (Medida 1)**



**Imagen 26: Medida experimental del impulso tipo rayo (Medida 2)**

**Tabla 4: Resultados medidos en el ensayo**

|          | Tensión (V) |       | Tiempo ( $\mu$ s) |              |
|----------|-------------|-------|-------------------|--------------|
|          |             |       |                   |              |
| Medida 1 | $V_p$       | 95500 | $t_p$             | -            |
|          | $V_{30}$    | 28650 | $t_{30}$          | 204,14       |
|          | $V_{90}$    | 85950 | $t_{90}$          | 204,80       |
|          | $V_1$       | -     | $T_1$             | <b>1,095</b> |
|          | $V_{O1}$    | 0     | $t_{O1}$          | 203,81       |
|          | $V_{50}$    | 47750 | $t_{50}$          | 252,71       |
|          | $V_2$       | -     | $T_2$             | <b>48,89</b> |
| Medida 2 | $V_p$       | 96687 | $t_p$             | -            |
|          | $V_{30}$    | 29006 | $t_{30}$          | 81,52        |
|          | $V_{90}$    | 87019 | $t_{90}$          | 82,17        |
|          | $V_1$       | -     | $T_1$             | <b>1,087</b> |
|          | $V_{O1}$    | 0     | $t_{O1}$          | 81,19        |
|          | $V_{50}$    | 48344 | $t_{50}$          | 129,17       |
|          | $V_2$       | -     | $T_2$             | <b>47,98</b> |

En la Tabla 5 se hace una comparación de las medidas experimentales, la simulación y de los resultados teóricos. Cabe destacar que los valores  $T_1$  y  $T_2$  son independientes del nivel de tensión al que se quiere llegar. Las desviaciones en los resultados analíticos pueden deberse a aproximaciones que se han hecho durante los cálculos. En el modelo de Simulink, como ya se ha comentado en un apartado anterior, se han modelado los explosores como un “Breaker” (interruptor), esto supone una aproximación que puede alterar los resultados de la simulación. Además, en el circuito real las impedancias tienen una tolerancia que afecta al resultado experimental. También la presencia de inductancias y capacitancias puede alterar la medida, así como la impedancia del arco eléctrico que se genera en el generador de Marx.

Como se puede observar en la tabla, los valores  $T_1$  y  $T_2$  entran dentro de los límites de tolerancia, por lo tanto, la forma de onda cumple satisfactoriamente con lo establecido en la norma [8].

**Tabla 5: Comparación de los datos y los resultados**

|       | Datos       | Tolerancia |                  | Resultados analíticos | Resultados de Simulación | Resultados experimentales (Medida 1) | Resultados experimentales (Medida 2) |
|-------|-------------|------------|------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $T_1$ | 1,2 $\mu$ s | +/- 30 %   | +/- 0,36 $\mu$ s | 1,13 $\mu$ s          | 1,05 $\mu$ s             | 1,095 $\mu$ s                        | 1,087                                |
| $T_2$ | 50 $\mu$ s  | +/- 20 %   | +/- 10 $\mu$ s   | 50,24 $\mu$ s         | 50,08 $\mu$ s            | 48,89 $\mu$ s                        | 47,98                                |

## 6. Conclusiones

En relación a la seguridad, se han estudiado las condiciones en las que se encuentra la instalación, es decir, ubicación, características del laboratorio, condiciones climáticas, tipo de entorno en el que va a estar el generador de Marx. Estos datos son clave para conocer los riesgos presentes y elaborar un informe de seguridad que se adapte al lugar de trabajo y así proporcionar un entorno seguro.

Conocidas las características de la instalación, se ha determinado el perímetro en el que puede existir riesgo eléctrico. Para eludir este riesgo se propone la separación de esta zona de peligro mediante una valla que impida la entrada accidental a la zona en tensión. Otras medidas adicionales han sido la señalización del laboratorio, se han conectado puestas a tierra para evitar los contactos indirectos, los trabajadores deben ponerse los equipos de protección que corresponda. Asimismo, se propone emplear una seta de emergencia que permite desconectar la instalación así como una llave de enclavamiento para bloquear la re-conexión de la instalación. De forma redundante, la apertura de la puerta de acceso supone la desconexión de la instalación. Todo lo mencionado antes se ha realizado teniendo en consideración la normativa correspondiente. Adicionalmente, se ha elaborado un manual de procedimientos para aquellas actividades en las que se ha considerado necesario.

En relación al comportamiento del generador, se ha obtenido un circuito equivalente sobre el que se ha trabajado. El circuito equivalente permite la comprensión del comportamiento del generador en el momento en el que se genera el impulso tipo rayo. Se ha estudiado el impulso tipo rayo normalizado y los tiempos de frente y hasta valor mitad que lo caracterizan. Bajo esa premisa se ha elaborado un modelo matemático utilizando la transformada de Laplace que ha permitido obtener la función que describe el impulso. Conociendo esa función se han podido obtener los tiempos  $t_{30}$ ,  $t_{50}$  y  $t_{90}$  que permiten calcular  $T_1$  y  $T_2$ . Para demostrar la validez del modelo se han comparado los resultados con los obtenidos mediante simulación. Se ha estudiado el circuito de medida dado que puede introducir errores en las medidas finales. El cable empleado ha sido coaxial dado su buen comportamiento ante el ruido, además del cable es de vital importancia tener cuidado en los puntos de conexión dado que una mala conexión puede alterar las medidas. Haciendo uso de la norma IEEE [12], se ha podido hacer una conexión adecuada. Se han probado varias opciones para encontrar un atenuador adecuado dado que es imposible hacer una conexión directa al osciloscopio por la elevada tensión a la salida del divisor capacitivo. Después de varias pruebas se ha encontrado una sonda adecuada y se han hecho medidas finales con ella. Los resultados se han comparado con la norma [8] asegurar que se cumplan los márgenes de tolerancia y así dando por finalizado este estudio.



## 7. Líneas futuras

Después de finalizar el trabajo se han encontrado varias opciones por donde podrían ir encaminados futuros proyectos:

- El divisor capacitivo posee capacidades parásitas que hacen de él un modelo complejo de estudiar, se podría comprender el funcionamiento real y cómo se reducen esas capacidades para que no interfieran en las medidas de los ensayos.
- Se podría montar el atenuador casero planteado y hacer ensayos para comparar las hipótesis que se han planteado en el Anexo 9. Además, se puede profundizar más en el tema y plantear nuevas hipótesis.
- A pesar de haber encontrado un atenuador que permita obtener medidas adecuadas, hay algunos atenuadores que no se ha llegado a comprender el por qué de los problemas que surgieron, plantear un modelo que permita descartar los atenuadores por sus características internas permitiría encontrar una solución rápida sin tener que probar entre varias opciones.
- Una vez realizados ensayos en vacío se puede estudiar el comportamiento del generador en carga y los ensayos que se pueden realizar a la aparamenta de alta tensión gracias al generador de Marx.
- El sistema permite medir la corriente que circula por la salida de generador. En la actualidad la aparamenta de medida no está caracterizada, ni conectada, ni probada. Es otra tarea pendiente.
- Otra línea posible es cambiar los componentes del equipo para la generación de impulsos de maniobra y realizar medidas.
- Es interesante también realizar medidas en equipos donde el impulso produzca la descarga completa entre sus terminales y ver si el sistema de medida presenta anchura de banda suficiente para una medida de precisión del impulso truncado.
- Por último, indicar que se puede mejorar la calidad de las medidas si se realiza un acoplamiento óptico entre la señal analógica de salida del condensador de alta tensión de medida y el osciloscopio.

## Bibliografía

- [1] España. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de riesgos laborales. Boletín Oficial del Estado, 10 de noviembre de 1995, núm. 269, p. 22.
- [2] España. Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. Boletín Oficial del Estado, 21 de junio de 2001, núm. 148, p. 15.
- [3] España. Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. Boletín Oficial del Estado, 12 de junio de 1997, núm. 140, p. 18.
- [4] España. Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. Boletín Oficial del Estado, 23 de abril de 1997, núm. 97, p. 14.
- [5] España. Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo. Boletín Oficial del Estado, 23 de abril de 1997, núm. 97, p. 13.
- [6] España. Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. Boletín Oficial de Estado, 7 de agosto de 1997, núm.188, p.8.
- [7] AENOR. Procedimiento para garantizar la protección de la salud y la seguridad de las personas en instalaciones eléctricas de ensayo y medida de alta tensión. UNE 207020 IN. Madrid: AENOR, 2012.
- [8] AENOR. Técnicas de ensayo de alta tensión. Parte 1: Definiciones generales y requisitos de ensayo. UNE-EN 60060. Madrid: AENOR, 2012.
- [9] HAEFELY. *Generateurd'ondes de choc, manual N. 508080/F, PB/18. 8.1972, documentación de HAEFELY que acompaña al equipo.*
- [10] García G., Diego Fernando; Rincón C., Diego Fernando. Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 kV. *Tecnura*. 2009, volumen 12, páginas 4-13. ISSN 0123-921X. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257020606002>
- [11] Martínez Tarifa, Juan Manuel. Sanz Feitio, Javier. *Aislamiento eléctrico de equipos de alta tensión*. Madrid: Garceta, 2020. ISBN: 978-84-17289-21-8
- [12] IEEE. IEEE Standard for High – Voltage Testing Techniques. IEEE Std 4<sup>TM</sup>. New York: IEEE, 2013
- [13] Colaboradores de wikipedia. Filtro paso bajo [en línea]. En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [Consulta: 18 de enero 2021]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_paso\\_bajo](https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_paso_bajo)
- [14] *FILTROS* [en línea] [consulta: 13 de junio de 2021]. Disponible en: <https://scuolalettrica.it/escuelaelectronica/electronica/transi3.php>

# Anexos

Layla El kajouai Ben allal  
Curso 2020/2021

## **Anexo 1. Obtención de las medidas de la valla**

Para delimitar adecuadamente la instalación y asegurar la seguridad de los trabajadores se ha empleado una valla cuyas dimensiones y distancia a la que debe colocarse se han obtenido en base a la norma UNE 207020 IN.

En la norma se acude al anexo A, tabla 1, en la instalación se genera un impulso tipo rayo a 500 kV, por lo que la distancia en el aire de las partes activas es  $s = 1400$  mm. La distancia puede ser menor si es desde una pared sin aberturas. Con este valor se delimita la zona prohibida.

A continuación se acude la tabla 2 del anexo antes mencionado. La altura elegida para la valla es de 2,4 m.

Para la distancia horizontal entre la valla y los puntos peligrosos  $c = 100$  mm, es el único valor que hay en la tabla dado que 2,4 m es una altura que nadie puede superar para intentar alcanzar el interior de la instalación.

Dado que la valla va a ser de rejilla, se acude a la tabla 3 del anexo A para seleccionar el tamaño de la abertura, como  $c = 100$  mm, la abertura máxima será de 12 mm.

## Anexo 2. Procedimiento de operación de la instalación

### 2. 1. Procedimiento ensayo generador de impulsos

Verificar siempre antes de conectar el generador que no permanece nadie en la zona de generación y avisar cuando se quiera poner en tensión la instalación.

#### 2.1.1. Fase previa a la carga

- Seguir los pasos del Anexo 2 para entrar a la zona de generación.
- Conectar cables AL3 (generador-armario) y AL4 (rectificador-armario).
- Poner autotransformador en la posición de mínimo (ruleta toda a la izquierda).
- Seta de emergencia **no pulsada**.
- Poner **MAIN SWITCH** B1 en “on”, se enciende la luz roja H1 y la verde B7 del **MAIN CONTACTOR**. En caso contrario el autotransformador no está en la posición de mínimo. Se enciende la luz de señalización blanca polarity.
- A través del pulsador B23 **GAP DISTANCE** es posible modificar la distancia de las esferas, hacia arriba para acercarla, hacia abajo para alejarla. Comprobar que detrás del armario el gap distance esté en posición “man”. Es posible leer en el cajón M del armario la indicación de distancia en función de la tensión de carga (mm/kV) en el medidor analógico indicado en el armario con **G2- gap distance**. Regular la distancia de forma que la tensión sea un 15% más alta del valor elegido.
- Elegir la polaridad del pulso (para el cambio de polaridad esperar aproximadamente 15 segundos).
- En el caso de utilizar CRO (osciloscopio) HAEFELY, ponerlo en marcha (esperar aproximadamente 15 minutos para su calentamiento).
- Esperar aproximadamente 10 minutos que se caliente la válvula Trigatrón (puesta a los pies del generador). Se notará que el motor puesto a su lado se parará después de los diez minutos.

#### 2.1.2. Carga de los condensadores

- En esta fase del ensayo se debe permanecer en la zona de control, no es necesario el uso de equipos de protección individual.
- Pulsar B7 **MAIN CONTACTOR**. Si el autotransformador se encuentra en la posición de mínimo (ruleta toda a la izquierda) el **BREAKER C8** se enclava.
- Pulsador B9 polarity pulsado.
- Pulsar **B15 EARTHING SWITCH** para permitir la **apertura de las varillas de puesta a tierra** (B28-B29) a los pies del generador. Las varillas tienen que estar abiertas para permitir la carga de los condensadores.
- Pulsar **B17 HIGH VOLTAGE** para enclavar el **BREAKER C9**. Es posible ahora variar la tensión en el autotransformador y leerla en el cajón M del armario a través de un voltímetro analógico indicado con **G4 IMPULSE GENERATOR**.
- Regular potenciómetro Trigatrón (“attention” se enciende cuando charging voltage llega al 95% de la tensión que se elige en el potenciómetro).
- Girar la ruleta del autotransformador para subir la tensión de entrada al transformador de AC.

- Dar el orden al Trigatrón de empezar la descarga pulsando **TRIGGER** en el armario. (Si se elige una distancia entre las esferas demasiado corta, el generador descargará solo, al revés, con una distancia demasiado grande, no descargará).

#### 2.1.3. Interrupción de la carga

- En esta fase del ensayo se debe permanecer en la zona de control, no es necesario el uso de equipos de protección individual.
- Pulsar B17, **HIGH VOLTAGE**.
- Bajar a cero la tensión de alimentación del autotransformador con la ruleta al tope izquierdo.
- **Pulsar B15 EARTHING SWITCH** para la puesta a tierra de la instalación. Varillas de puesta a tierra cierran.
- Pulsar **B7 MAIN CONTACTOR**.
- Apagar el armario girando **B1 MAIN SWITCH** en posición cero.
- Gap distance en 0 (B23).

**Alternativa: pulsar la seta de emergencia**

## 2. 2. Actuaciones en la zona de generación

### 2.2.1. Para entrar en la zona de generación

- Verificar correcto funcionamiento de los medidores de tensión ubicados en el armario de control antes de desconectar la alimentación.
- Desconectar el generador de Marx desde el armario de control según el Anexo 2, apartado 2.1.
- Retirar la llave de la seta de emergencia para enclavamiento del armario de control (solo el Jefe de trabajo podrá volver a reconectarla).
- Se recomienda señalizar en el armario de control que se está trabajando en la zona de generación.
- Verificar el correcto estado de los equipos de protección a emplear (en la puerta de la valla se indican los equipos de protección obligatorios).
- Ponerse los equipos de protección según las instrucciones del fabricante.
- Verificar ausencia de tensión desde el armario de control, CHARGING VOLTAGE G3 debe estar a cero.
- En caso de manipular cableado de medida se toma como medida adicional el uso de guantes aislantes.
- Abrir la puerta, coger pértiga de puesta a tierra colocada al lado de la puerta y comprobar visualmente el buen estado y la conexión del cable de tierra.
- Colocar la pértiga en el punto señalado en la Imagen 36 del Anexo 4.
- Si durante los trabajos la pértiga se debe sustituir, primero se hace un puente o puesta a tierra alternativa.

Si no se cumple alguno de los pasos anteriormente especificados se considerará la instalación en tensión y no se podrá trabajar en la zona prohibida.

### 2.2.2. Al salir de la zona prohibida

- Retirar herramientas no necesarias de la zona prohibida.
- Todo el personal de trabajo debe salir fuera de la zona prohibida.
- Retirar pértiga con puesta a tierra y colocarla al lado de la puerta de la valla, en la zona de generación.
- Cerrar puerta de la valla con llave.
- Retirar señalización de zona de trabajo del armario de control en caso de que la hubiera.
- Advertir de que se va a aplicar tensión.
- Jefe de trabajo reconecta llave en la seta de emergencia.

### Anexo 3. Boletín para el control de la supresión de la tensión

| Supresión de la tensión en alta tensión  |
|--|
| Fecha.....   |
| Instalación.....   |
| Responsable de las operaciones, D.....   |
| <input type="checkbox"/> 1º DESCONEXIÓN<br><br>Desconectar la alimentación desde el armario de control, siguiendo la secuencia específica en el procedimiento de desconexión en el Anexo 2 del informe de seguridad. |
| <input type="checkbox"/> 2º ENCLAVAMIENTO<br><br>Accionar la seta de emergencia retirando la llave de ésta para prevenir una posible realimentación.   |
| <input type="checkbox"/> 3º VERIFICAR AUSENCIA DE TENSIÓN<br><br>Verificar la ausencia de tensión con los instrumentos de medida ubicados en el armario de control.  |
| <input type="checkbox"/> 4º PONER A TIERRA Y EN CORTOCIRCUITO<br><br>Comprobar visualmente que las varillas de puesta a tierra están conectadas.   |
| Firma:   |



## Anexo 4. Imágenes de la instalación

### Armario de control



Imagen 27: Bloque M del armario de control



Imagen 28: Bloque B del armario de control



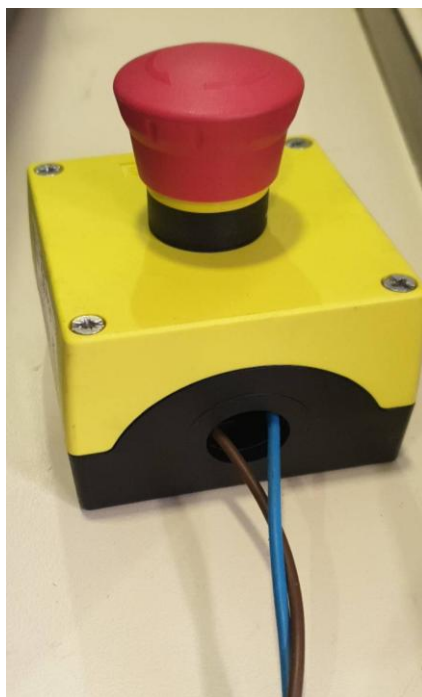
Imagen 29: Bloque Z del armario de control



**Imagen 30: Bloque T del armario de control**



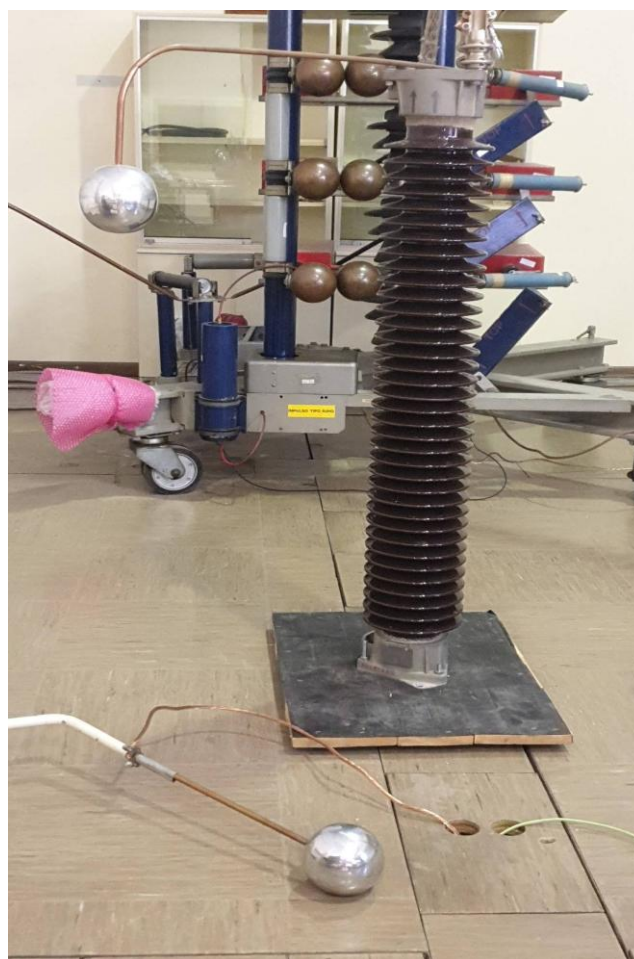
**Imagen 31: Bloque I del armario de control**



**Imagen 32: Seta de emergencia**



**Imagen 33: Transformador+ rectificador**



**Imagen 34: Columna aisladora**



**Imagen 35: Divisor de tensión capacitivo**



Punto de conexión  
de la pértiga

**Imagen 36: Señalización del punto de conexión de la pértiga de puesta a tierra**



## Anexo 5. Señales



Imagen 37: Señal de advertencia

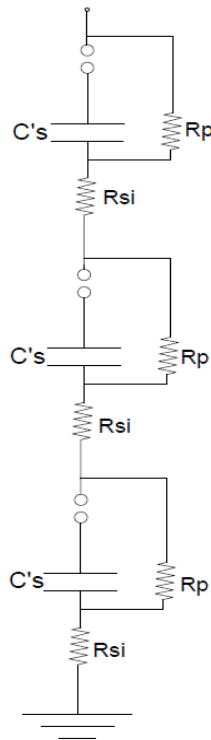


Imagen 38: Señal de obligación de uso de calzado



Imagen 39: Señal de obligación de uso de guantes



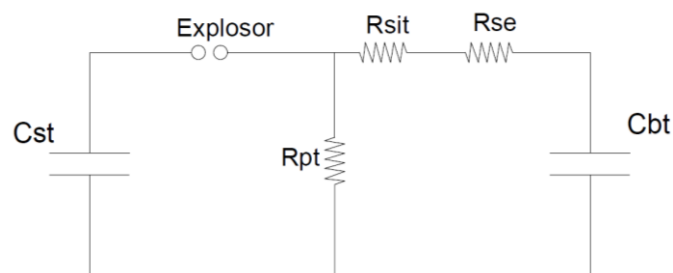


**Imagen 42: Conversión circuito genérico paso 2**

Para calcular los valores de la Imagen 43 se emplean las fórmulas siguientes.

- $R_{sit} = N \cdot R_{si}$
- $R_{pt} = R_p \cdot N$
- $C_{st} = C_s / N'$
- $C_{bt} = (C_{bp \text{ total}} \cdot C_{bs}) / (C_{bp \text{ total}} + C_{bs})$
- $N = 3$  (3 etapas)
- $N' = 6$  (3 etapas, 2 condensadores por etapa)

Donde  $C_{bs}$  es la capacidad del secundario del divisor capacitivo y  $C_{bp \text{ total}}$  es la capacidad total del primario del divisor capacitivo



**Imagen 43: Circuito equivalente**

## Anexo 7. Cálculo de la tensión en Cb

Aplicando Laplace:

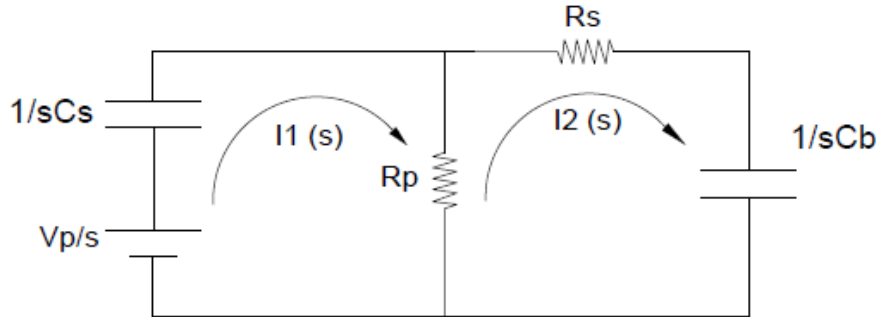


Imagen 44: Circuito equivalente en el dominio de Laplace

$$\frac{V_p}{S} = \frac{I_1(S)}{S \cdot C_s} + R_p \cdot (I_1(S) - I_2(S))$$

$$R_p \cdot (I_1(S) - I_2(S)) = \frac{I_2(S)}{S \cdot C_b} + R_s \cdot I_2(S)$$

$$I_1(S) = \frac{\frac{I_2(S)}{S \cdot C_b} + R_s \cdot I_2(S) + R_p \cdot I_2(S)}{R_p}$$

$$I_1(S) = \frac{I_2(S) + R_s \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S) + R_p \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S)}{R_p \cdot C_b \cdot S}$$

$$\begin{aligned} \frac{V_p}{S} &= \frac{I_2(S) + R_s \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S) + R_p \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S)}{R_p \cdot C_b \cdot C_s \cdot S^2} + \\ &+ \frac{I_2(S) + R_s \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S) + R_p \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S)}{C_b \cdot S} - R_p \cdot I_2(S) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{V_p}{S} &= \frac{I_2(S) + R_s \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S) + R_p \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S)}{R_p \cdot C_b \cdot C_s \cdot S^2} + \\ &+ \frac{I_2(S) + R_s \cdot S \cdot C_b \cdot I_2(S)}{C_b \cdot S} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_p \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_b \cdot S &= I_2(S) + R_s \cdot C_b \cdot S \cdot I_2(S) + R_p \cdot C_b \cdot S \cdot I_2(S) + \\ &+ R_p \cdot C_s \cdot S \cdot I_2(S) + R_s \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_b \cdot S^2 \cdot I_2(S) \end{aligned}$$



$$I_2(S) = \frac{V_p \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_b \cdot S}{1 + (R_s \cdot C_b + R_p \cdot C_b + R_p \cdot C_s) \cdot S + R_p \cdot R_s \cdot C_b \cdot C_s \cdot S^2}$$

$$V_{cb}(S) = \frac{1}{C_b \cdot S} \cdot \frac{V_p \cdot R_p \cdot C_s \cdot C_b \cdot S}{1 + (R_s \cdot C_b + R_p \cdot C_b + R_p \cdot C_s) \cdot S + R_p \cdot R_s \cdot C_b \cdot C_s \cdot S^2}$$

$$V_{cb}(S) = \frac{V_p \cdot R_p \cdot C_s}{1 + (R_s \cdot C_b + R_p \cdot C_b + R_p \cdot C_s) \cdot S + R_p \cdot R_s \cdot C_b \cdot C_s \cdot S^2}$$

$$V_{cb}(S) = \frac{\frac{V_p}{R_s \cdot C_b}}{\frac{1}{R_p \cdot R_s \cdot C_s \cdot C_b} + \frac{(R_s \cdot C_b + R_p \cdot C_b + R_p \cdot C_s)}{R_p \cdot R_s \cdot C_s \cdot C_b} \cdot S + S^2}$$

Donde:

$$a = \frac{R_s \cdot C_b + R_p \cdot C_b + R_p \cdot C_s}{R_p \cdot R_s \cdot C_s \cdot C_b} = \frac{1}{R_p \cdot C_s} + \frac{1}{R_s \cdot C_s} + \frac{1}{R_s \cdot C_b}$$

$$b = \frac{1}{R_p \cdot R_s \cdot C_s \cdot C_b}$$

$$V_{cb}(S) = \frac{\frac{V_p}{R_s \cdot C_b}}{S^2 + a \cdot S + b}$$

$$s = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4 \cdot 1 \cdot b}}{2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}$$

$$V_{cb}(S) = \frac{V_p}{R_s \cdot C_b} \cdot \frac{1}{(S + \alpha - \beta) \cdot (S + \alpha + \beta)} = \frac{A}{S + \alpha - \beta} + \frac{B}{S + \alpha + \beta}$$

$$A \cdot (S + \alpha + \beta) + B \cdot (S + \alpha - \beta) = \frac{V_p}{R_s \cdot C_b}$$

$$S = -(\alpha + \beta) \rightarrow B = -\alpha - \beta + \alpha - \beta = \frac{V_p}{R_s \cdot C_b}$$

$$B = \frac{-V_p}{2 \cdot R_s \cdot C_b \cdot \beta}$$

$$S = -(\alpha - \beta) \rightarrow A = -\alpha + \beta + \alpha + \beta = \frac{V_p}{R_s \cdot C_b}$$

$$A = \frac{V_p}{2 \cdot R_s \cdot C_b \cdot \beta}$$

$$V_{cb}(S) = \frac{V_p}{2 \cdot R_s \cdot C_b \cdot \beta \cdot (S + \alpha - \beta)} - \frac{V_p}{2 \cdot R_s \cdot C_b \cdot \beta \cdot (S + \alpha + \beta)}$$

$$V_{cb}(t) = \frac{V_p}{2 \cdot R_s \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} - e^{-(\alpha+\beta) \cdot t})$$

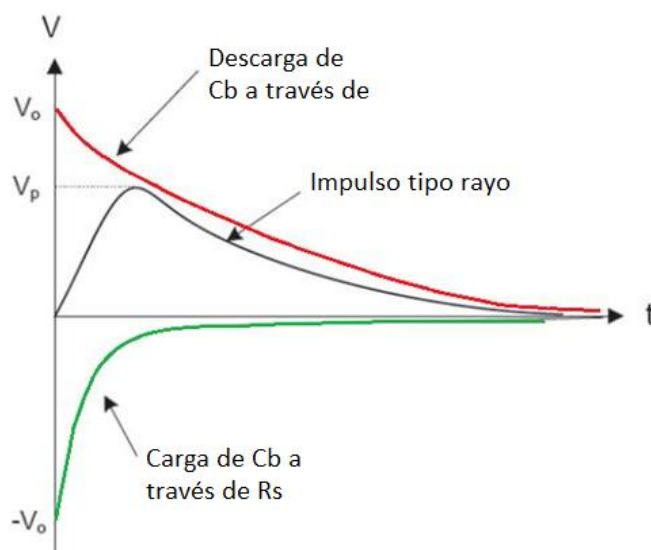
$$\alpha = \frac{a}{2}$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}$$

$$a = \frac{1}{R_p \cdot C_s} + \frac{1}{R_s \cdot C_s} + \frac{1}{R_s \cdot C_b}$$

$$b = \frac{1}{R_p \cdot R_s \cdot C_s \cdot C_b}$$

## Anexo 8. Cálculo tiempo $T_1$ y $T_2$



**Imagen 45: Impulso tipo rayo**

$$V_{cb}(t) = \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} - e^{-(\alpha+\beta) \cdot t})$$

Obtención  $t_p$ : tiempo en el que la tensión es máxima

En el punto máximo la pendiente es cero

$$\frac{dV_{cb}(t)}{dt} = \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (-(\alpha - \beta) \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} + (\alpha + \beta) e^{-(\alpha+\beta) \cdot t})$$

$$V'_{cb}(t) = \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot ((-\alpha + \beta) \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} + (\alpha + \beta) e^{-(\alpha+\beta) \cdot t})$$

$$0 = (-\alpha + \beta) \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} + (\alpha + \beta) \cdot e^{-(\alpha+\beta) \cdot t}$$

$$-(-\alpha + \beta) \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t} = (\alpha + \beta) \cdot e^{-(\alpha+\beta) \cdot t}$$

$$-\frac{(-\alpha + \beta)}{(\alpha + \beta)} = \frac{e^{-(\alpha+\beta) \cdot t}}{e^{-(\alpha-\beta) \cdot t}}$$

$$\frac{(\alpha - \beta)}{(\alpha + \beta)} = e^{(-\alpha-\beta+\alpha-\beta) \cdot t}$$

$$\frac{(\alpha - \beta)}{(\alpha + \beta)} = e^{-2 \cdot \beta \cdot t}$$

$$\frac{(\alpha + \beta)}{(\alpha - \beta)} = e^{2 \cdot \beta \cdot t}$$

$$\ln\left(\frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}\right) = \ln e^{2 \cdot \beta \cdot t}$$

$$t_p = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \ln\left(\frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}\right)$$

Obtención de  $t_{30}$ : En  $t_{30}$  la tensión es el 30% del máximo. El término “ $-(\alpha + \beta)$ ” es mayor que “ $-(\alpha - \beta)$ ” lo que hará que esa exponencial decrezca más rápido. Conociendo esto y sabiendo que en  $t_p$  la tensión es máxima, se puede afirmar que el término “ $e^{-(\alpha + \beta) \cdot t}$ ” se puede aproximar a cero quedando así una ecuación simplificada.

$$0,3 \cdot V_{cbtp} = V_{cbt30}$$

$$0,3 \cdot \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_p}) =$$

$$= \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_{30}} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{30}})$$

$$0,3 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} - 0,3 \cdot e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_p} = e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_{30}} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{30}}$$

$$0,3 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} = e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_{30}} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{30}}$$

La curva decrece más despacio al principio del tramo:

$$e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} \approx e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_{30}}$$

$$e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{30}} = 0,7 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p}$$

$$t_{30} = \frac{\ln(0,7 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p})}{-(\alpha + \beta)}$$

Obtención de  $t_{90}$ :

$$0,9 \cdot V_{cbtp} = V_{cbt90}$$

$$0,9 \cdot \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_p}) =$$

$$= \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_{90}} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{90}})$$

$$0,9 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} - 0,9 \cdot e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_p} = e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_{90}} - e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{90}}$$

$$e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p} \approx e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{90}}$$

$$e^{-(\alpha + \beta) \cdot t_{90}} = 0,1 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p}$$

$$t_{90} = \frac{\ln(0,1 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot t_p})}{-(\alpha + \beta)}$$

Obtención de  $t_{50}$ :

$$0,5 \cdot V_{cb_{tp}} = V_{cb_{t50}}$$

$$\begin{aligned} 0,5 \cdot \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p} - e^{-(\alpha+\beta) \cdot t_p}) = \\ = \frac{V_p}{2 \cdot R_S \cdot C_b \cdot \beta} \cdot (e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_{50}} - e^{-(\alpha+\beta) \cdot t_{50}}) \end{aligned}$$

$$0,5 \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p} - 0,5 \cdot e^{-(\alpha+\beta) \cdot t_p} = e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_{50}} - e^{-(\alpha+\beta) \cdot t_{50}}$$

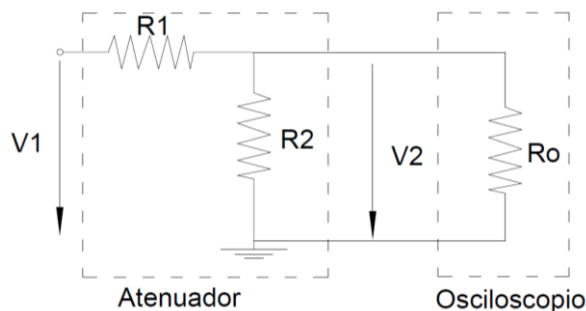
$$t_{50} = \frac{\ln(0,5 \cdot e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p})}{-(\alpha - \beta)}$$

Conclusión: En caso de estar en la zona antes de llegar a  $t_p$ , se desprecia el término  $e^{-(\alpha+\beta) \cdot t_p}$  porque el exponencial en esa zona es prácticamente cero, la carga de  $C_b$  ha terminado. Los términos  $e^{-(\alpha-\beta) \cdot t_p}$  y  $e^{-(\alpha+\beta) \cdot t_p}$  son aproximadamente iguales.

El caso después de pasar por  $t_p$  es más simple dado que el término  $e^{-(\alpha+\beta) \cdot t}$  ya se ha hecho cero en ambos lados de la ecuación. La variación de  $e^{-(\alpha-\beta) \cdot t}$  es apreciable, ya no se puede igualar a distintos tiempos.

## Anexo 9. Compensación divisor resistivo

Se diseñó un primer atenuador a partir de dos resistencias que permitía dividir la tensión x100 de forma que el divisor quedaba tal que así:

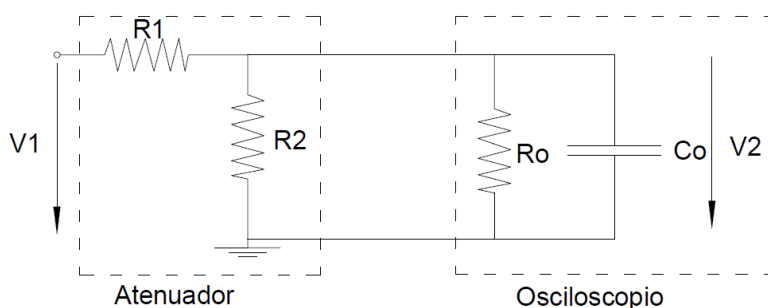


**Imagen 46: Circuito atenuador + osciloscopio a baja frecuencia**

Para bajas frecuencias, el divisor de la Imagen 46 es más que suficiente para obtener la atenuación deseada; no obstante, a altas frecuencias, el osciloscopio tiene una capacidad parásita que afecta en la atenuación de la señal, Imagen 47. Dada la presencia de esa capacidad se ha obtenido la función de transferencia (12) para observar el comportamiento del sistema. La función de transferencia revela que en el circuito se ha formado un filtro paso bajo.

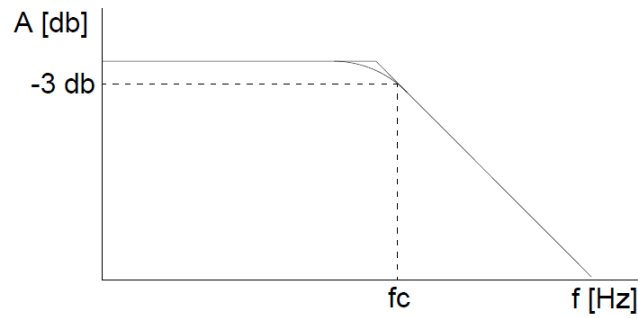
En la Imagen 48 se representa la curva que define el comportamiento del filtro paso bajo.

Es importante conocer la frecuencia de corte, la cual es la frecuencia a la que la amplitud de salida se ha reducido a un 70,7 % del valor de la entrada, esa reducción se corresponde con una atenuación de 3 dB. En la Imagen 48 se ve el punto donde corta la frecuencia [13].



**Imagen 47: Circuito atenuador + osciloscopio a alta frecuencia**

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_o}}{1 + \frac{R_1 \cdot R_o \cdot C_o \cdot R_2}{R_2 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_o} S} \quad (12)$$



**Imagen 48: Filtro paso bajo**

Para conocer la frecuencia de corte se ha calculado conforme al Anexo 11.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{R_1 \cdot R_o \cdot C_o \cdot R_2}{R_2 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_o}} \quad (13)$$

La frecuencia de corte se ha calculado con los siguientes resultados:

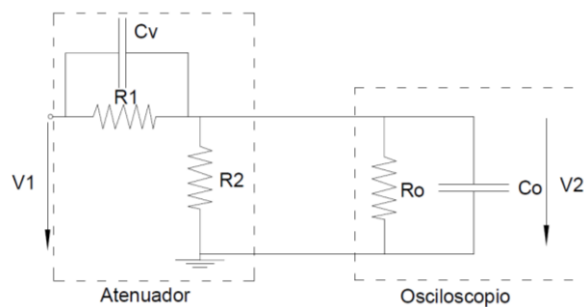
$$\begin{aligned} R_1 &= 10 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 1 \text{ M}\Omega \\ C_o &= 20 \text{ pF} \\ R_o &= 1 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

Donde  $R_o$  y  $C_o$  son datos del osciloscopio con el que se esté trabajando, este caso se ha hecho con el modelo Tektronix TDS 210.  $R_1$  y  $R_2$  se han obtenido conforme al Anexo 10.

La frecuencia de corte obtenida es de 812 kHz.

La frecuencia de corte obtenida no es suficiente como para poder obtener una medida adecuada, si la capacidad parásita es mayor debido a los conectores y el cable, la frecuencia será mucho menor. Con aumentar la capacidad parásita a los 100 pF la  $f_c$  es de 162 kHz.

Para poder aumentar la frecuencia de corte se pone un condensador en paralelo con  $R_1$  para compensar, tal como se ve en la Imagen 49.



**Imagen 49: Circuito con compensación**

A partir de la Imagen 49 se obtiene nuevamente la función de transferencia:

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 + R_o} \cdot (1 + R_1 \cdot C_v \cdot S)}{\frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 + R_o} \cdot (1 + R_1 \cdot C_v \cdot S) + R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_o \cdot C_o \cdot R_2}{R_2 + R_o} S\right)} \quad (14)$$

Dado que se puede modificar  $C_v$ , se regula para cumplir la condición de la ecuación (15) la cual se ha obtenido como se describe en el Anexo 10.

$$C_v = \frac{R_2 \cdot R_o}{R_1 \cdot (R_2 + R_o)} \cdot C_o \quad (15)$$

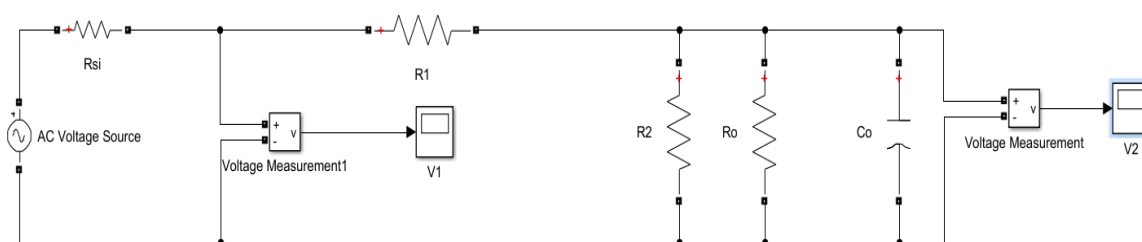
Al cumplir la ecuación (15) los polos se cancelan con el cero de forma que la atenuación ya no depende de la frecuencia y queda la ecuación (16).

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

A partir de la ecuación (16) y el factor de atenuación x100, se ha elegido una resistencia de 10 k $\Omega$  y a partir de ello se ha calculado una resistencia  $R_1$  de 1 M $\Omega$ , Anexo 10. Conociendo los valores de la impedancia del osciloscopio empleado, modelo TektronixTDS 210 ( $R_o = 1$  M $\Omega$ ,  $C_o = 20$  pF) se ha obtenido  $C_v = 0,2$  pF. Es un valor muy bajo y no se ha encontrado ningún condensador variable de ese rango, no obstante, en la realidad la capacidad parásita será mucho mayor por lo que se ha comentado con anterioridad. De forma que se tendría que re calcular  $C_v$  para la capacidad que haya en el caso de estudio.

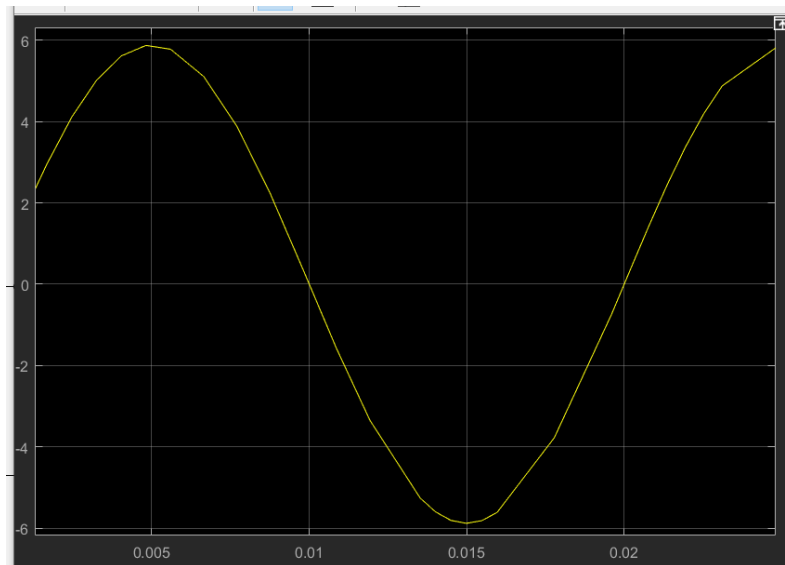
Para demostrar la importancia de la compensación del atenuador se ha hecho una simulación en Simulink. Para ello se ha colocado una fuente de tensión senoidal de 600 V de amplitud y se ha ido variando la frecuencia. En la Imagen 50 se ha comparado la tensión de entrada con respecto a la salida sin compensar, en la Imagen 53 se ha colocado un condensador  $C_v = 0,2$  pF.

Para 50 Hz los efectos de la capacidad no son perceptibles, por lo que la tensión se atenúa x 100 tal y como se espera, Imagen 51. A la frecuencia de corte,  $f_c = 811690$  Hz, la curva se ha reducido a un 70,7 % respecto al caso sin compensar, Imagen 52. Al colocar el condensador  $C_v$ , a la misma frecuencia de corte de antes, la atenuación nuevamente es x100, Imagen 54. Se ha comprobado el comportamiento de la tensión de salida a 10 MHz, una frecuencia más que suficiente para el caso de estudio y la curva se atenúa x 100, Imagen 55. Esto quiere decir que al compensar el circuito se verifica lo que se ha mencionado anteriormente.

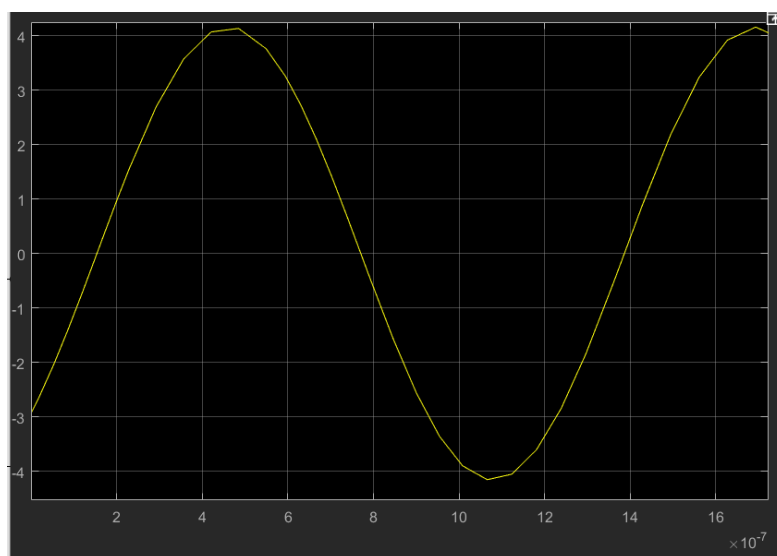


**Imagen 50: Representación circuito sin compensar en Simulink**

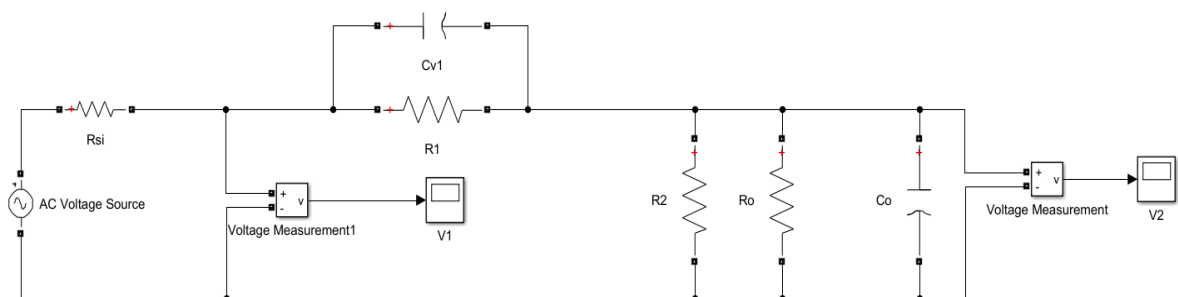




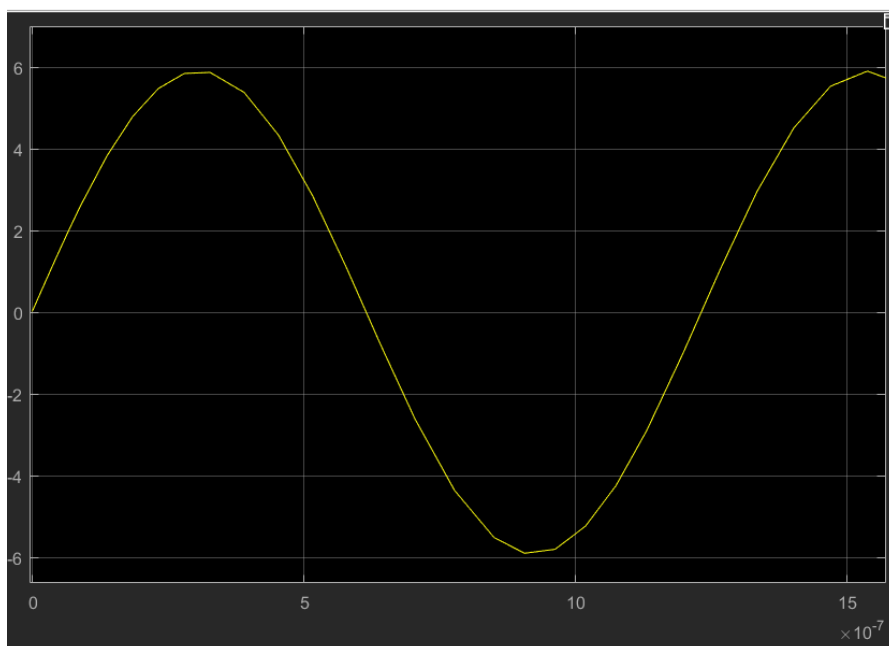
**Imagen 51: Tensión de salida para 50 Hz**



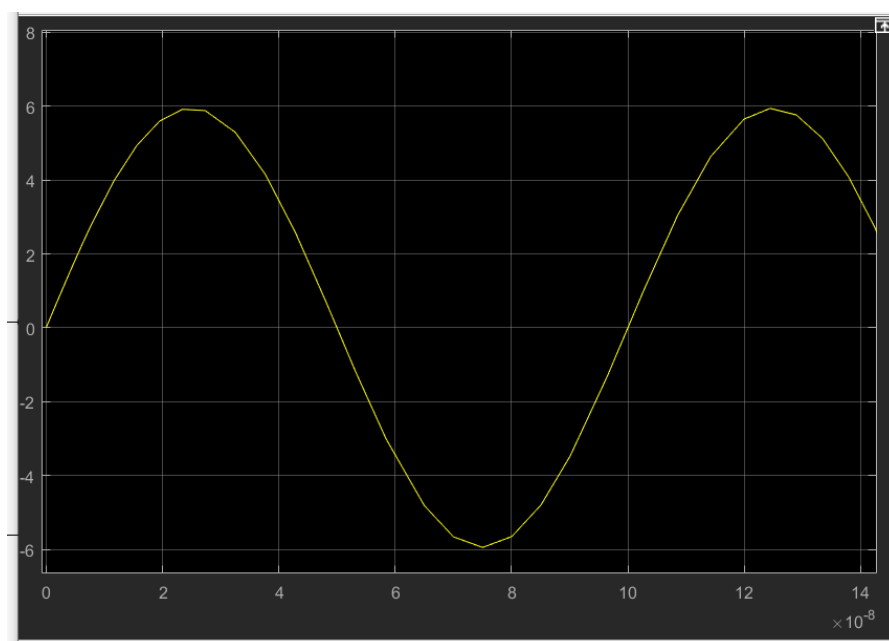
**Imagen 52: Tensión de salida para la  $f_c = 811$  kHz sin compensar**



**Imagen 53: Representación circuito compensado en Simulink**



**Imagen 54: Tensión de salida para  $f_c = 811$  kHz con compensación**



**Imagen 55: Tensión de salida para 10 MHz**

## Anexo 10. Cálculos de las ecuaciones de compensación

Cálculo de la función de transferencia sin compensar:

$$Z_1 = \frac{\frac{1}{C_o \cdot S} \cdot R_o}{\frac{1}{C_o \cdot S} + R_o} = \frac{R_o}{1 + R_o \cdot C_o \cdot S}$$

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot Z_1}{R_2 + Z_1} = \frac{R_2 \cdot \frac{R_o}{1 + R_o \cdot C_o \cdot S}}{R_2 + \frac{R_o}{1 + R_o \cdot C_o \cdot S}}$$

$$Z_2 = \frac{\frac{R_2 \cdot R_o}{1 + R_o \cdot C_o \cdot S}}{R_2 + \frac{R_o}{1 + R_o \cdot C_o \cdot S}} = \frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 + R_o + R_2 \cdot R_o \cdot C_o \cdot S}$$

$$V_2(S) = \frac{Z_2}{R_1 + Z_2} \cdot V_1(S)$$

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 + R_o + R_2 \cdot R_o \cdot C_o \cdot S}}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 + R_o + R_2 \cdot R_o \cdot C_o \cdot S}}$$

$$\boxed{\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_o + R_1 \cdot R_2 \cdot R_o \cdot C_o \cdot S}}$$

Cálculo de la función de transferencia con compensación:

$$Z_1 = \frac{R_o}{1 + R_o \cdot C_o \cdot S}$$

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot R_o}{R_2 + R_o + R_2 \cdot R_o \cdot C_o \cdot S}$$

$$Z_3 = \frac{R_1}{1 + R_1 \cdot C_v \cdot S}$$

$$V_2(S) = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot V_1(S)$$

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0 + R_2 \cdot R_0 \cdot C_0 \cdot S}}{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0 + R_2 \cdot R_0 \cdot C_0 \cdot S} + \frac{R_1}{1 + R_1 \cdot C_v \cdot S}}$$

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot (1 + R_1 \cdot C_v \cdot S)}{R_2 \cdot R_0 \cdot (1 + R_1 \cdot C_v \cdot S) + R_1 \cdot (R_2 + R_0 + R_2 \cdot R_0 \cdot C_0 \cdot S)}$$

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0} \cdot (1 + R_1 \cdot C_v \cdot S)}{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0} \cdot (1 + R_1 \cdot C_v \cdot S) + R_1 \cdot (1 + \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot C_0}{R_2 + R_0} \cdot S)}$$

$$1 + R_1 \cdot C_v \cdot S = 1 + \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot C_0}{R_2 + R_0} \cdot S$$

$$C_v = \frac{R_2 \cdot R_0}{R_1 \cdot (R_2 + R_0)} \cdot C_0$$

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0}}{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0} + R_1}$$

$$\frac{V_2}{V_1}(S) = \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

Cálculo de la frecuencia de corte:

$$\frac{V_2}{V_1}(s) = \frac{\frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 \cdot R_0 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_0}}{1 + \frac{R_1 \cdot R_0 \cdot C_0 \cdot R_2}{R_2 \cdot R_0 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_0} S}$$

$$a = \frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 \cdot R_0 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_0}$$

$$b = \frac{R_1 \cdot R_0 \cdot C_0 \cdot R_2}{R_2 \cdot R_0 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_0}$$

$$\frac{V_2}{V_1}(s) = \frac{a}{1 + b \cdot s}$$

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \frac{a}{\sqrt{1^2 + (b \cdot \omega)^2}} = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

$$\sqrt{1^2 + (b \cdot \omega)^2} = \sqrt{2}$$

$$(b \cdot \omega)^2 = 1$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot b}$$

Cálculo de  $R_1$ ,  $R_2$  y  $C_v$ :

- Se da a  $R_2$  el valor de 10 k $\Omega$
- Con la fórmula  $\frac{1}{100} = \frac{R_2}{R_2 + R_1}$  se despeja  $R_1 \rightarrow R_1 = 99 \cdot R_2 = 990000$
- Con la fórmula  $C_v = \frac{R_2 \cdot R_0}{R_1 \cdot (R_2 + R_0)} \cdot C_0$  se sustituyen los valores y se obtiene  $C_v$ ;  $C_0$  es el valor de la capacidad parásita del osciloscopio, pero hay que sumarle la capacidad del cable y de los distintos elementos que componen el dispositivo para obtener la capacidad parásita real.

## Anexo 11. Características de los atenuadores

### Atenuador de baja impedancia



**Imagen 56: Atenuador de baja impedancia de entrada**

Referencia RS COMPONENTS: 395-0453

Impedancia de entrada: 50  $\Omega$

Atenuación: X10

Ancho de Banda: 1 GHz

### Sonda Testec TT-HV-251



**Imagen 57: Sonda Testec TT-HV -251**

Referencia WARWICK TEST SUPLIES: TT-HV-251

Impedancia de entrada: 100 M $\Omega$ ; 6 pF

Atenuación: X100

Frecuencia Máxima: 200 MHz

Máxima tensión de entrada: 2500 V

### Sonda diferencial



**Imagen 58: Sonda diferencial**

Referencia RS COMPONENTS: 729-6677

Impedancia de entrada: 4 M $\Omega$

Atenuación: X20, X50, X200

Ancho de banda: 25 MHz

### Sonda Tektronix TPP0250



**Imagen 59: Sonda pasiva de alta impedancia**



**Imagen 60: Sonda diferencial de alta impedancia visto de cerca**

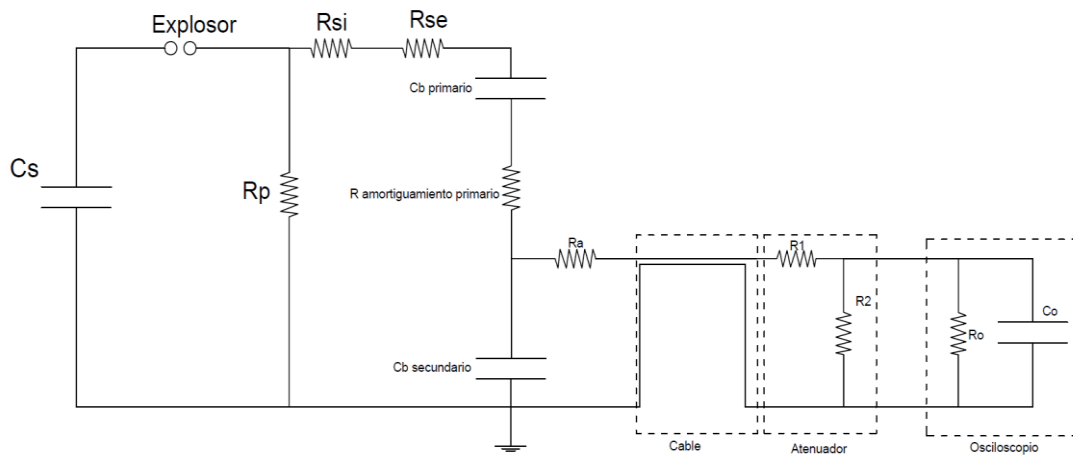
Referencia RS COMPONENTS: 797-3396

Atenuación: X10

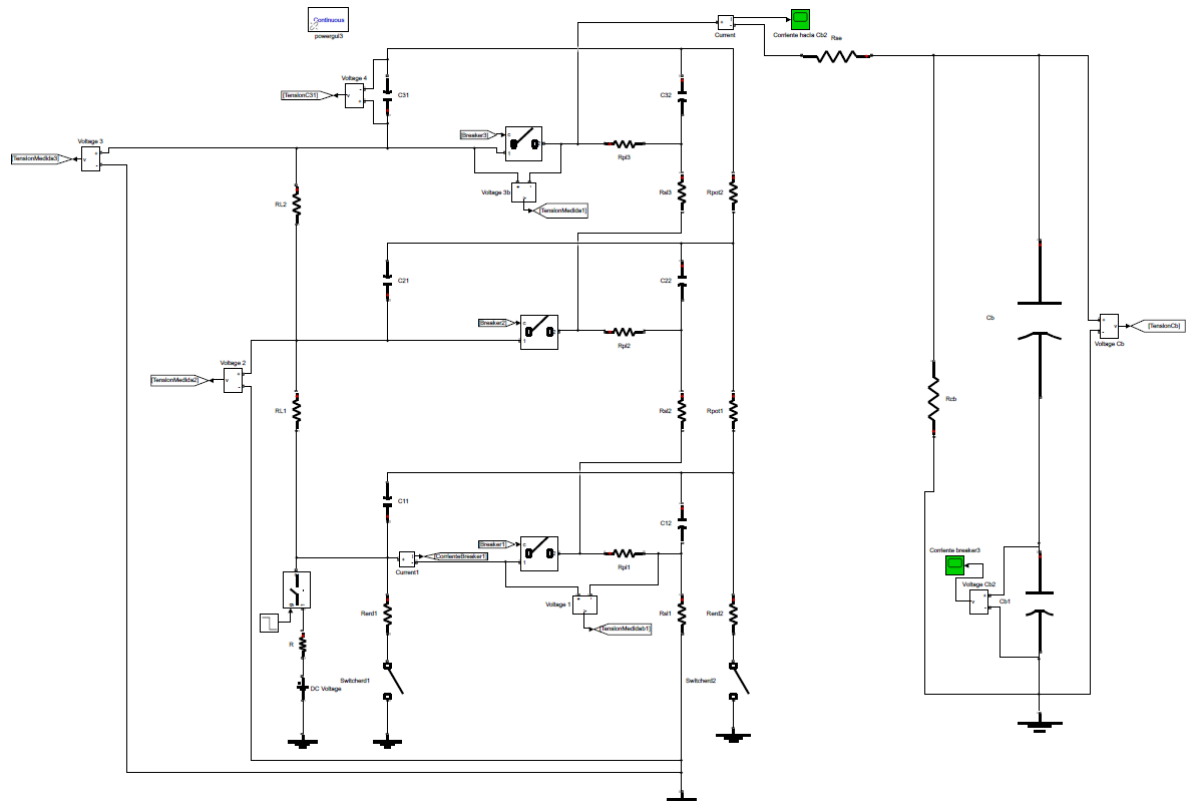
Frecuencia Máxima: 250 MHz

Máxima tensión de entrada: 2500 V

## Anexo 12. Circuito equivalente completo



**Imagen 61: Circuito equivalente completo**



**Imagen 62: Circuito equivalente del generador de Marx en Simulink**



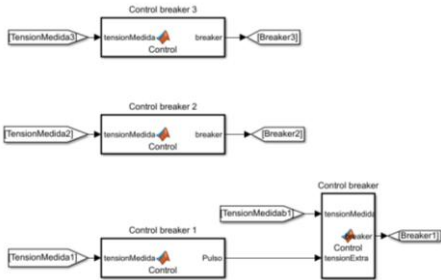


Imagen 63: Control de los breakers del modelo del generador de Marx

## Anexo 13. Código Matlab que obtiene $T_1$ y $T_2$ a partir de datos del osciloscopio

```
%Lee la columna que se le especifica del archivo "Filtrada"

Divisor_capacitivo=829;
Escala_kV=1;
G=Escala_kV*Divisor_capacitivo;
Tension=G*Filtrada(:,3);

%Calcula el valor máximo que alcanza la curva

Maximo = max(Tension);

%Busca la posición que ocupa el valor máximo en el vector

[Row]= find(Tension==Maximo);

%Calcula el valor de tensión al 30%,50% y 90% del máximo

tension30 = 0.3 * Maximo;
tension50 = 0.5 * Maximo;
tension90 = 0.9 * Maximo;

%Inicializo variables para el bucle for
n=0;
c=0;
DeltaV30antigua=100;
DeltaV50antigua=10;
DeltaV90antigua=10;

%En este bucle for empieza en la posición 1 del vector y cuenta hasta el
%tiempo en el que se alcanza el máximo (t30 y t90). Se hace un barrido del
%vector que contiene los valores de tensión y se le resta el valor de V30
%que se debería alcanzar. El que menor DeltaV tenga será el valor que más
%se aproximará al deseado. Una vez se encuentra el menor DeltaV posible la
%condición if ya no se cumplirá y quedará registrada la i (posición que
%ocupa el valor de tensión deseado) final. La i indica el numero de pasos
%que se han dado hasta llegar al valor deseado.

for i=1:1:Row

    DeltaV30 = abs(Tension(i) - tension30);

    if DeltaV30<DeltaV30antigua
        DeltaV30antigua = DeltaV30;
        valorVector30 = i;
    end

    DeltaV90 = abs(Tension(i) - tension90);

    if DeltaV90<DeltaV90antigua
```

```
DeltaV90antigua = DeltaV90;
valorVector90 = i;
end

n=n+1;
end

for a=Row:1:length(Medida{1,1})
DeltaV50 = abs(Tension(a) - tension50);

if DeltaV50<DeltaV50antigua
DeltaV50antigua = DeltaV50;
valorVector50 = a;
end
c=c+1;
end

%En t queda recogido el paso que se da entre valores muestreados

t=Cfg.Ts;

%valorVector nos indica el numero de muestra alcanzado que multiplicado por
%el paso temporal da el tiempo t30.

t30 = t*valorVector30;
t50 = t*valorVector50;
t90 = t*valorVector90;
T1=(1/0.6)*(t90-t30);
to1=t30-0.3*T1;
T2=t50-to1;

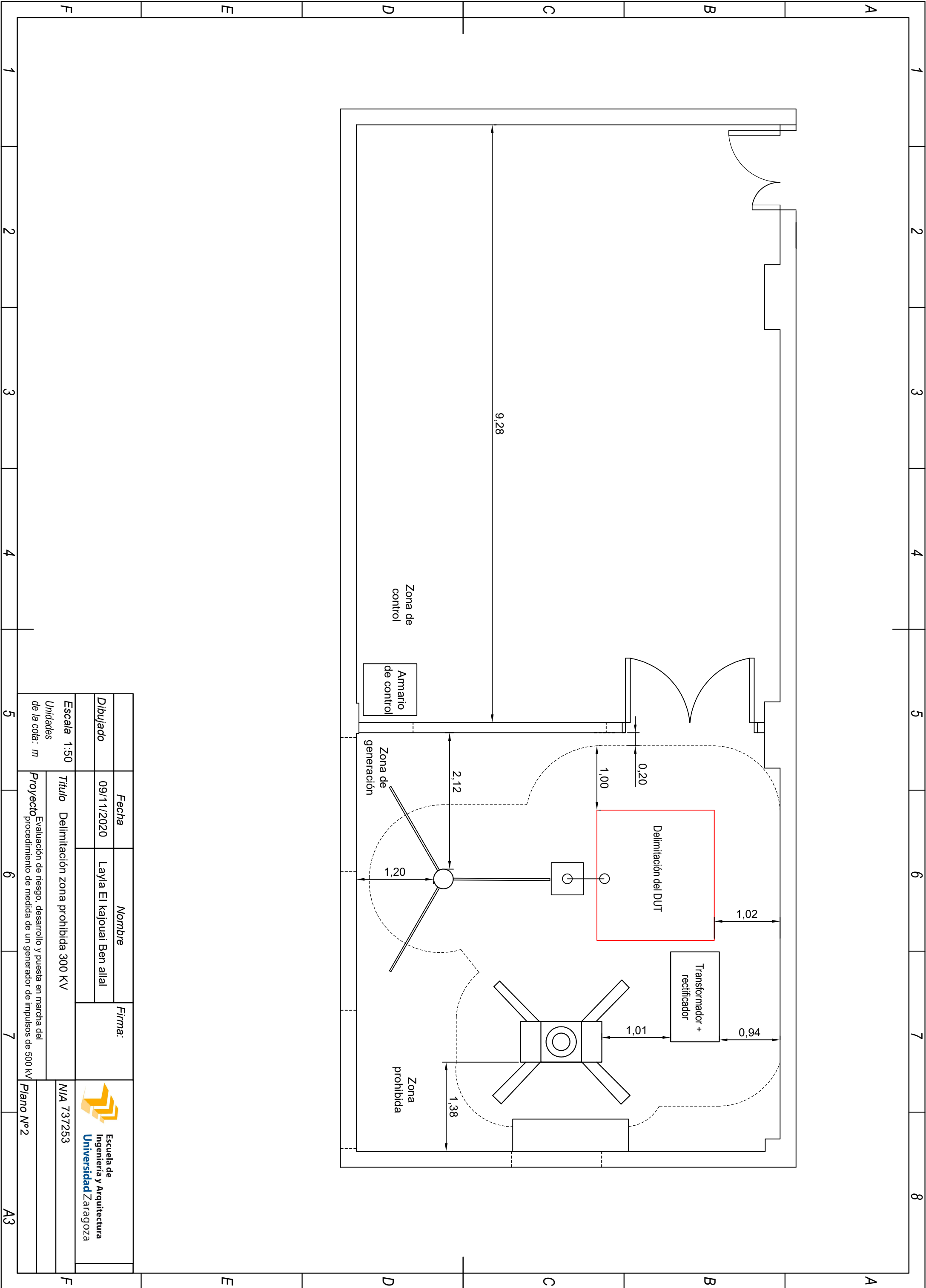
% Visualizacion de resultados

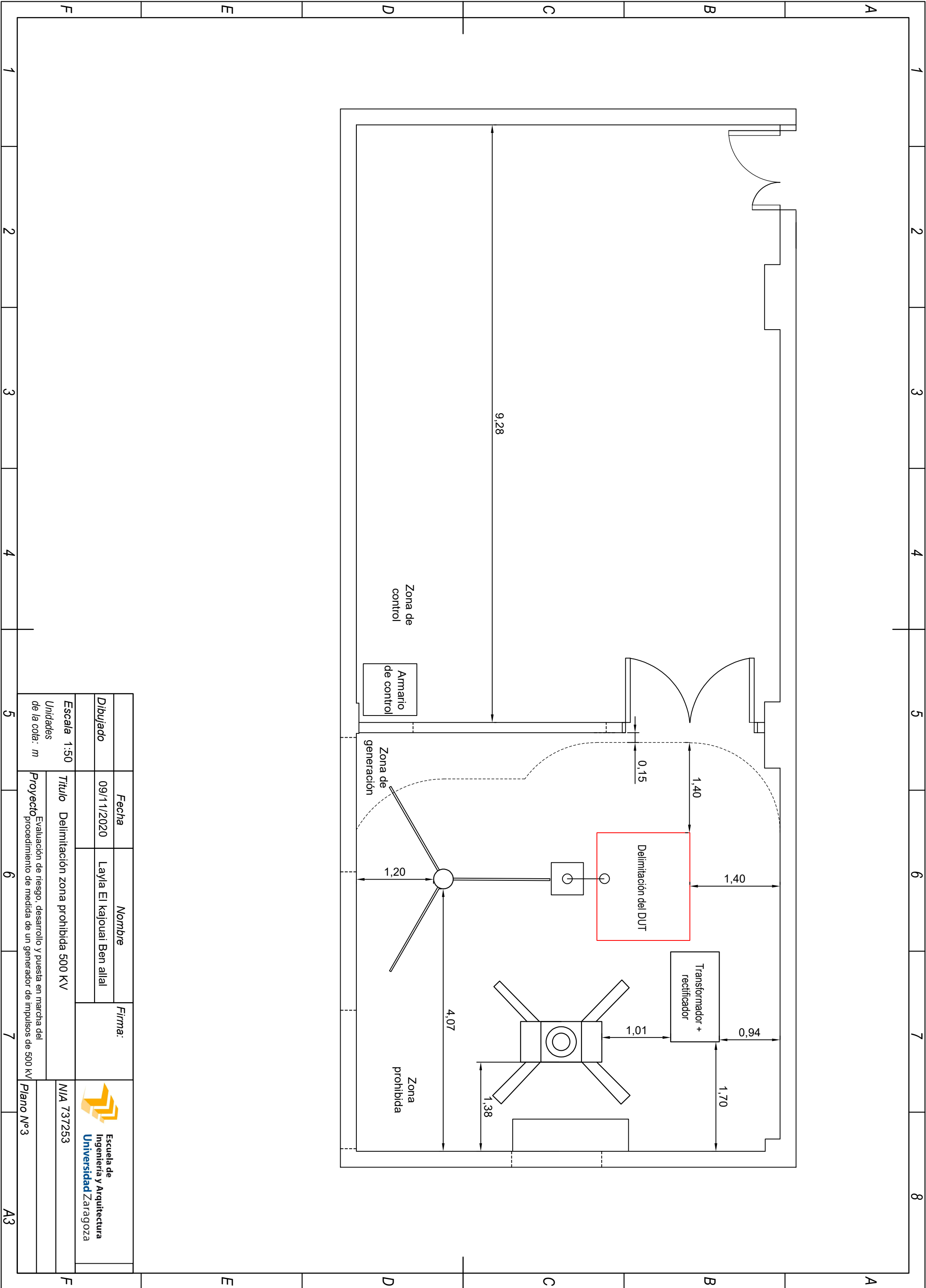
disp('Maximo =');
disp(Maximo);
disp('tension 30 % =');
disp(tension30);
disp('tension 50 % =');
disp(tension50);
disp('tension 90 % =');
disp(tension90);
disp('t30(s)=');
disp(t30);
disp('t50(s)=');
disp(t50);
disp('t90(s)=');
disp(t90);
disp('T1(s)=');
disp(T1);
disp('to1(s)=');
disp(to1);
disp('T2(s)=');
disp(T2);
```


# Planos

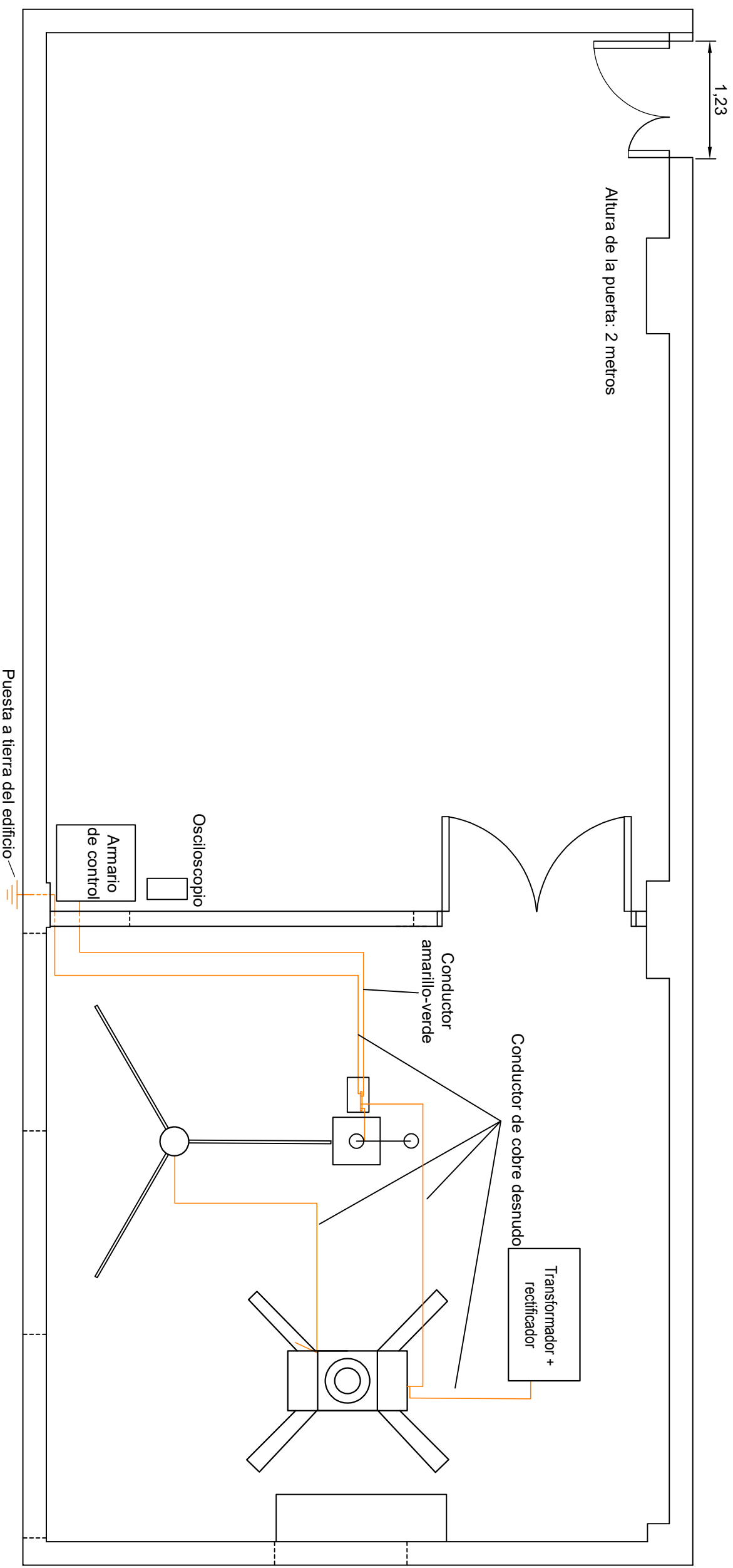
Layla El kajouai Ben allal  
Curso 2020/2021








|                        |  |  |                            |  |        |  |  |
|------------------------|--|--|----------------------------|--|--------|--|--|
|                        | Fecha  |  | Nombre                     |  | Firma: | <br>Escuela de<br>Ingeniería y Arquitectura<br>Universidad Zaragoza |  |
|                        | 09/11/2020   |  | Layla El kajouai Ben allal |  |        |  |  |
| Dibujado               |  |  |                            |  |        |  |  |
|                        |  |  |                            |  |        |  |  |
| Escala 1:50            |  |  |                            |  |        |  |  |
| Unidades de la cota: m | Titulo Delimitación zona prohibida 500 KV  |  |                            |  |        | N/A 737253   |  |
|                        | Proyecto Evaluación de riesgo, desarrollo y puesta en marcha del procedimiento de medida de un generador de impulsos de 500 kV |  |                            |  |        |  |  |
|                        |  |  |                            |  |        | Plano Nº3  |  |



|                        |  |                            |        |   |  |
|------------------------|--|----------------------------|--------|---|--|
|                        |  |                            |        |   |  |
|                        | Fecha  | Nombre                     | Firma: | <br>Escuela de Ingeniería y Arquitectura<br>Universidad Zaragoza |  |
| Dibujado               | 09/11/2020   | Layla El kajouai Ben allal |        |   |  |
| Escala 1:50            | Título Plano de conexión a tierra  |                            |        | N/A 737253  |  |
| Unidades de la cota: m | Proyecto Evaluación de riesgo, desarrollo y puesta en marcha del procedimiento de medida de un generador de impulsos de 500 kV |                            |        | Plano Nº 4  |  |



